

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

OPTICKÝ ZDROJ SE SUPERLUMINISCENČNÍ DIODOU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTOR

JAKUB JURÁŇ

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION**  
**DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS**

# **OPTICKÝ ZDROJ SE SUPERLUMINISCENČNÍ DIODOU**

**REALIZATION OF THE OPTICAL SOURCE WITH SUPERLUMINESCENT DIODE**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTOR

**JAKUB JURÁŇ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. ONDŘEJ ČOŽÍK**

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

## Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Mikroelektronika a technologie

**Student:** Jakub Juráš **ID:** 154752  
**Ročník:** 3 **Akademický rok:** 2014/2015

### NÁZEV TÉMATU:

### Optický zdroj se superluminiscenční diodou

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostuduje problematiku řízení superluminiscenční diody za účelem realizace optického zdroje. Optický zdroj musí být schopen pracovat v impulzním i kontinuálním režimu. U impulzního režimu bude umožněno nastavení amplitudy spínaného proudu až do 300 mA, šířka generovaného pulzu (od 200 ns) i opakovací frekvence generování impulzu (od 1  $\mu$ s). V kontinuálním režimu bude řízena pouze velikost proudu protékajícího superluminiscenční diodou. Nezávisle na zvoleném režimu, bude umožněno řízení teploty použitého optického zdroje. Při realizaci bude kladen důraz na dosažení přesného a stabilního optického zdroje schopného konkurovat dnešním optickým zdrojům pro průmyslové aplikace. Výstupem práce bude kompletní dokumentace pro výrobu desky plošného spoje optického zdroje, včetně soupisu součástek. Dále student přehledně popíše veškeré funkce navrženého řešení a v závěru srovná vlastnosti vzniklého optického zdroje se zdroji dostupnými na trhu.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 10. 2. 2015

**Termín odevzdání:** 4. 6. 2015

**Vedoucí práce:** Ing. Ondřej Čožík

**Konzultanti semestrální práce:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „**Optický zdroj se superluminiscenční diodou**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 3. června 2015

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřejovi Čožíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

Mé poděkování také patří společnosti Moravské přístroje a.s. za umožnění přístupu ke strojnímu vybavení, jež jsem využil při realizaci zapojení.

V Brně dne 3. června 2015

.....  
podpis autora

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem optického zdroje se superluminiscenční nebo laserovou diodou. Nejprve je v ní rozebrána problematika optických zdrojů v podobě laserových diod (koherentního záření). Práce obsahuje popis realizace navrženého zapojení, jejíž součástí jsou bloky řízení teploty a proudů, blok napájení a blok řízení. Součástí je rozbor jednotlivých funkčních bloků, dále pak programového vybavení řízení obvodu včetně detailního popisu funkce.

## **Klíčová slova**

Laserová dioda, Řízení proudu laserové diody, Řízení teploty laserové diody.

## **Abstract**

This bachelor's thesis describes design of the optical source with superluminescent or laser diode. Firstly, the problems of optical sources in the form of laser diodes (coherent light sources) are analyzed. The thesis contains a description of the realization of circuit that includes blocks of temperature and current flow control, block of the power management and the control block. The electrical circuit is divided into the functional modules, their functionality is explained in details. It also includes description of the software designated for controlling of the circuit's functions.

## **Keywords**

Laser diode, Laser diode current control, Laser diode temperature control.

## **Bibliografická citace:**

JURÁŇ, J. *Optický zdroj se superluminiscenční diodou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2015. 39 s., 19 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Ondřej Čožík.

# Obsah

Úvod.....	9
1. Teoretický rozbor .....	10
1.1. Princip laserů obecně .....	10
1.2. Princip polovodičových laserů .....	11
1.3. Princip superluminiscenčních diod.....	12
2. Možnosti řízení laserové diody .....	12
3. Popis zapojení optického zdroje.....	13
3.1. Blok napájení .....	13
3.2. Blok řízení teploty .....	15
3.3. Blok řízení proudu laserovou diodou .....	22
3.4. Blok hlavní řídicí logiky .....	24
4. Návrh konstrukce a desek plošných spojů .....	24
4.1. Hlavní řídicí deska.....	25
4.2. Deska předního panelu .....	27
5. Osazení a oživování zapojení .....	27
5.1. Osazování hlavní řídicí desky.....	27
5.2. Oživení zapojení .....	30
5.3. Dodatečné úpravy .....	31
6. Programové vybavení.....	31
6.1. Programová výbava mikrokontroléru .....	31
6.2. Uživatelské rozhraní ovládání přes osobní počítač .....	35
Závěr .....	36
Bibliografie .....	37

## Seznam obrázků

<b>Obrázek 1:</b> Rovinná vlna, roviny elektrické (E) a magnetické (B) vlny a směr šíření jsou vzájemně kolmé [4].	10
<b>Obrázek 2:</b> Spektra polovodičových zdrojů záření [6].	11
<b>Obrázek 3:</b> Obecný princip činnosti laseru (a). Struktura heterostrukturního laseru vyzařujícího z hrany (b) a z povrchu (c) [7].	11
<b>Obrázek 4:</b> Závislost optického výkonu laserové diody na protékajícím proudu.	12
<b>Obrázek 5:</b> Možný typ zapouzdření laserové diody. V pouzdře typu Butterfly je integrován čip LD (1), snímací fotodioda (2) a termistor (3) na společné podložce (4), dále je v pouzdře termočlánek (5), soustava optických členů (6, 7) a výstup na optické vlákno (9, 10). Celá komponenta je zapouzdřena v kovovém pouzdře (8) a připojena plochými vývody (11) [9].	13
<b>Obrázek 6:</b> Blokové schéma napájecího bloku.	14
<b>Obrázek 7:</b> Příklad Peltierova termoelektrického článku [13].	15
<b>Obrázek 8:</b> Blokové schéma zapojení pro řízení teploty laserové diody.	16
<b>Obrázek 9:</b> Zjednodušené schéma zapojení tranzistorového H-můstku napájecího termočlánek (a) a průběhy napětí v regulačním obvodu (viz text) (b). [2]	17
<b>Obrázek 10:</b> Zjednodušené zapojení regulačního obvodu znázorňující regulační smyčku. ...	17
<b>Obrázek 11:</b> Blokové schéma zapojení řízení proudu laserovou diodou.	23
<b>Obrázek 12:</b> Převodní charakteristika vstupního napětí na pinu typu CI na výstupní proud (piny typu LDK), pro toleranční rozptyl jednotlivých výrobků [1].	23
<b>Obrázek 13:</b> Blokové schéma části řízení a komunikace s nadřazenými systémy.	25
<b>Obrázek 14:</b> Fotografie výseku DPS s nanesenou pájecí pastou (deformace obrazu způsobena zobrazením přes lupu).	28
<b>Obrázek 15:</b> Fotografie spodní DPS s naneseným lepidlem (červená barva) a osazenou většinou součástí.	29
<b>Obrázek 16:</b> Fotografie osazené DPS včetně vývodových součástí.	29
<b>Obrázek 17:</b> Záznam zákmitu na 5 V napájecí větvi zachycený na osciloskopu (invertované barvy).	30
<b>Obrázek 18:</b> Zjednodušený vývojový diagram softwaru mikrokontroléru.	32
<b>Obrázek 19:</b> Ukázka uživatelského ovládacího programu pro osobní počítače.	35

## Seznam příloh

- Příloha A:** Blokové schéma zapojení optického zdroje se superluminiscenční diodou
- Příloha B:** Schéma zapojení bloku řízení teploty
- Příloha C:** Schéma zapojení bloku řízení proudu laserovou diodou
- Příloha D:** Schéma zapojení hlavního bloku řízení s periferiemi
- Příloha E:** Schéma zapojení bloku napájení doplněné o síťový transformátor a síťový filtr
- Příloha F:** Konstrukční návrh hlavní řídicí desky
- Příloha G:** Konstrukční návrh desky předního panelu
- Příloha H:** Seznam použitých součástek hlavní desky
- Příloha I:** Seznam použitých součástek desky předního panelu

## Úvod

V rámci bakalářské práce je rozebrána problematika návrhu napájení superluminiscenční, respektive laserové diody s možností teplotní i proudové regulace jak kontinuálního, tak pulzního režimu dle požadavků uživatele zařízení. Výsledkem návrhu je optický zdroj se superluminiscenční diodou s vlastním ovládacím rozhraním a s možností ovládání přes připojený osobní počítač pomocí USB. Požadavkem je stabilita nastaveného výstupního optického výkonu, možnost nastavení frekvence výstupních optických pulzů od kontinuálního režimu po 1 MHz a šířky pulzů od 200 ns. Výstupní světelné pulzy musí mít konstantní amplitudu a co největší strmosti hran bez zákmitů, aby bylo možné zařízení použít k měřicím účelům. Navrhované zapojení musí být schopné hlídat a regulovat teplotu laserové diody.

Výstupní výkon laserové či superluminiscenční diody je dán amplitudou proudu protékajícího diodou, navrhovaný zdroj je tedy proudového charakteru s možností rychlého spínání. Tyto požadavky splňuje integrovaný obvod pro řízení laserových diod iC-HG od společnosti iC-Haus [1]. Kromě protékajícího proudu je ovlivněn výstupní výkon i teplotou polovodičového čipu diody. Právě ke sledování a regulaci teploty pomocí integrovaného aktivního termoelektrického článku přímo v pouzdře specializovaných diod (viz obrázek 5) je použito zapojení s integrovaným obvodem LT1923 od společnosti Linear Technology [2]. Obvod řízení teploty je ovládán nadřazeným mikrokontrolérem, který zároveň zajišťuje komunikaci s připojeným osobním počítačem či s tlačítkovým ovládacím rozhraním a umožňuje výpis aktuálních informací o stavu zařízení na displej.

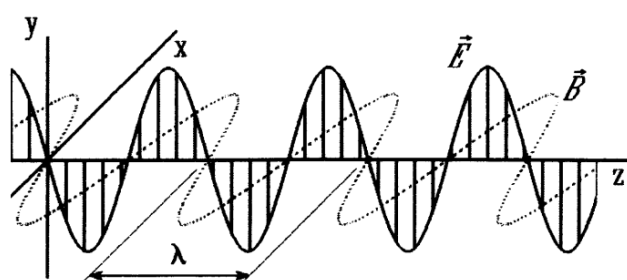
Celé zapojení je realizováno na dvojici desek plošných spojů, přičemž hlavní deska obsahující takřka kompletní řízení diody je realizována jako čtyřvrstvá, druhá, pouze jednostranná deska, pak slouží k připojení ovládacích tlačítek, displeje a indikačních diod na předním panelu.

# 1. Teoretický rozbor

V následujících kapitolách bude rozebrán princip činnosti laseru, laserové diody a rozdíly mezi nimi a mezi diodami superluminiscenčními. Dále budou stručně definovány možnosti jejich řízení.

## 1.1. Princip laserů obecně

Samotný název „LASER“ je zkratka anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu znamená zesilování světla pomocí stimulované emise záření [3]. Jak již název napovídá, jedná se o zdroj světla zesíleného stimulovanou emisí. Stimulovaná emise elektromagnetického záření je princip generování koherentního elektromagnetického záření s velmi úzkým spektrem.

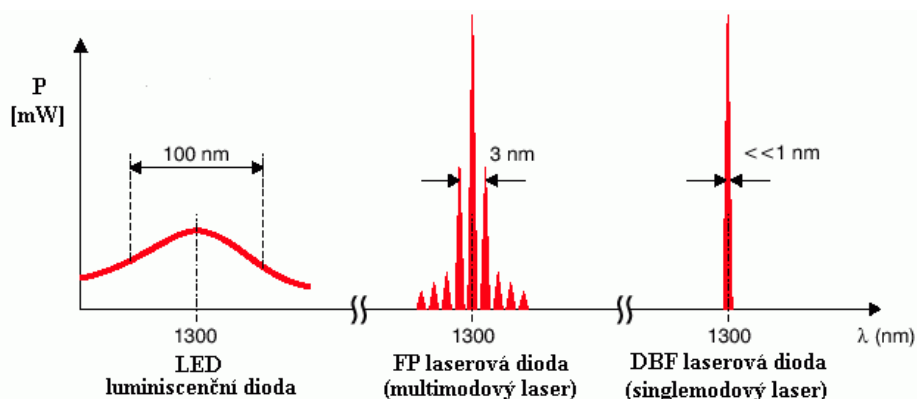


**Obrázek 1:** Rovinná vlna, roviny elektrické ( $\vec{E}$ ) a magnetické ( $\vec{B}$ ) vlny a směr šíření jsou vzájemně kolmé [4].

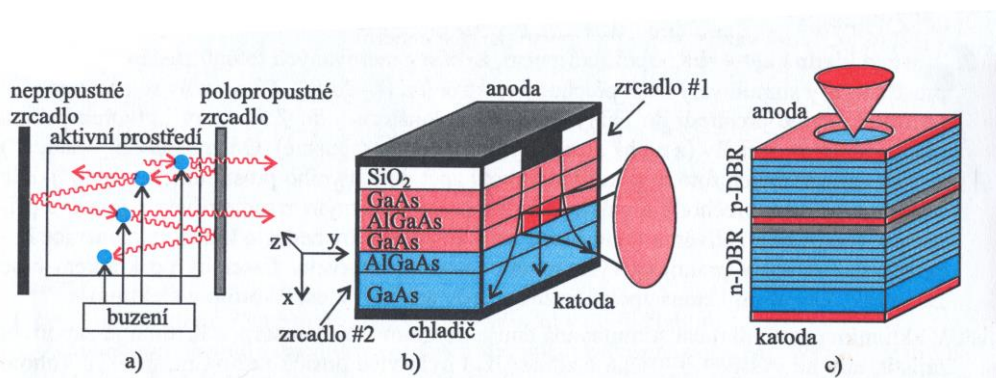
Princip emise elektromagnetického záření obecně spočívá v absorpci energie hmotou, čímž dojde k přechodu elektronů na vyšší energetické hladiny a při následném přechodu těchto elektronů zpět na nižší úroveň dochází k uvolnění (emisi) energie ve formě záření. U běžných látek vzniká pouze spontánní emise, kdy se elektron nacházející se na excitované hladině po uplynutí doby života nestabilního stavu samovolně vrací na původní úroveň za vyzáření fotonu energie. Je-li v materiálu excitováno více částic, dochází k emisi průběžně, vždy po uplynutí doby života jednotlivých excitací a vyzáření fotonů pak mají nahodilý směr a polarizaci (prostorové natočení elektrické a k ní kolmé magnetické vlny záření, viz obrázek 1, je pro každou emitovanou vlnu náhodný – nekoherentní záření). Pokud je však doba života vybudované částice dostatečně dlouhá k tomu, aby jinde emitovaný foton proletěl v její blízkosti dříve, než sama přejde do nižšího stavu, dojde tímto průletem ke „shození“ excitovaného elektronu na nižší a k takzvané stimulované emisi dalšího fotonu. Nově vyzářený foton má totožné vlastnosti jako foton původní a výsledkem jsou tak dva fotony prostorově i časově koherentní (oba mají shodnou polarizaci). Aby bylo výstupní záření zcela koherentní a nedocházelo k pohlcování již uvolněných fotonů, musí se v látce nacházet větší množství excitovaných částic, nežli částic ve stavu základním (teprve tak může docházet k zesilování stimulovanou emisí). Této situaci se říká stav inverzní populace částic a materiál označujeme jako aktivní prostředí. Jak již bylo nastíněno, inverzního stavu populace může být dosaženo pouze u látek a excitačních hladin s dlouhou dobou života (tzv. metastabilní hladiny). Většina materiálů pro výrobu laserů se skládá z více látek, kde může být základní materiál excitován do více nestabilních stavů, ze kterých přechází elektrony na hladiny metastabilní způsobené přítomností příměsí (donorů). Aby byl výstupem laseru dostatečně silný svazek koherentního záření, uzavírá se aktivní oblast mezi plně odrazné a polopropustné zrcadlo. Díky tomu polopropustným zrcadlem prochází jen část paprsku a zbytek se vrací zpět do aktivní oblasti a slouží k vybudování dalších koherentních fotonů.

## 1.2. Princip polovodičových laserů

U polovodičových laserů je aktivním prostředím přímo oblast PN přechodu, jež je buzená průtokem proudu. Při tomto ději dochází ke vzniku párů elektron-díra a jejich následnou rekombinací se uvolňuje záření (viz obrázek 3 a)). Zásadním rozdílem oproti ostatním laserům je, že elektrony zde nepřechází mezi diskretními energetickými hladinami, ale mezi valenčním pásem a různými hladinami v pásu vodivosti [5]. Díky tomu není výstupní záření čistě monochromatické, ale zabírá určitou šířku spektra. Užší spektrum je oproti běžné luminiscenci LED způsobeno stimulovanou emisí, a také nastavením rezonančních zrcadel. U polovodičových laserů se namísto klasických odrazných ploch využívá vysokého rozdílu indexů lomu na přechodu mezi polovodičem a vzduchem. Aby byl odraz co největší, musí být rozhraní vedeno podél krystalové roviny materiálu, čehož docílíme štípáním stěn krystalu podél těchto linií a jejich následným vyleštěním (vzniká tak zvaný Fabryův-Perotův rezonátor). Mezi takovými odraznými plochami je pro určité vlnové délky vytvořeno stojaté vlnění, u kterého dochází k výrazně většímu zesilování oproti ostatním vlnovým délkám – nastavením vzdáleností odrazných ploch je možné určit frekvenci záření laserové diody. Pro zvýšení koherence světla je možné upravit či doplnit rezonátor o další optické členy selektující pouze vlny požadované polarizace a podobně (optické hranoly vybroušené pod Brewsterovým úhlem, difrakční mřížky a další). Na obrázku 2 je naznačeno srovnání spektrálních charakteristik LED, polovodičového laseru s Fabryho-Perotovým rezonátorem a laseru využívajícího princip Fabryho-Perotova rezonátoru s broušením hran pod Brewsterovým úhlem.



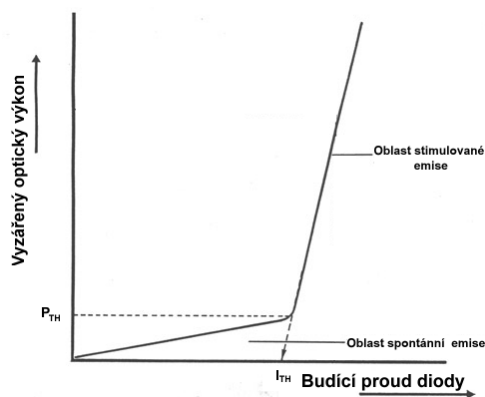
Obrázek 2: Spektra polovodičových zdrojů záření [6].



Obrázek 3: Obecný princip činnosti laseru (a). Struktura heterostrukturního laseru vyzařujícího z hrany (b) a z povrchu (c) [7].

Buzení laserové diody lze rozdělit do několika fází. Nejprve při malém proudu vzniká záření pouze spontánní emisí vyzařované do všech stran a přechod se chová jako u běžné LED. Zvýšením proudu přechodem narůstá počet vyzařených fotonů rekombinací a začíná se objevovat i stimulovaná emise. Ta s dále rostoucím proudem způsobuje, že největší intenzita

výstupního záření odpovídá středu spektra spontánního záření, ostatní frekvence jsou stimulovanou emisí potlačovány. Je-li tento jev převládající, říká se mu superluminiscence (pořád se neuplatňuje rezonance a emise tak probíhá všemi směry a ve všech polarizacích, zužuje se pouze spektrum záření). Dalším zvyšováním proudu nad prahovou hodnotu ( $I_{TH}$ ) klesají ztráty způsobené absorpcí, začíná převládat stimulovaná emise a světlo se stává koherentním – přechod k laserovému režimu (viz obrázek 4). Dalšího zvýšení koherence a monochromatickosti lze dosáhnout už jen použitím (selektivních) rezonátorů [5].



**Obrázek 4:** Závislost optického výkonu laserové diody na protékajícím proudu.

Jestliže čerpáme aktivní prostředí průchodem elektrického proudu přímo na pracovní hladinu, nedochází ke zbytečným ztrátám přechody z nestabilních na metastabilní hladiny. Polovodičové lasery díky tomu vynikají vysokou účinností. Pro zvýšení účinnosti bývá vytvořeno mnoho polovodičových vrstev o různé koncentraci dalších příměsí (heterostrukturní polovodič). Vytvoří se tak rozhraní zajišťující vyšší potenciálový spád a sníží se tím pohyb nosičů napříč polovodičem (nosiče jsou více vtahovány do oblasti přechodu – vyšší účinnost, snížení prahového proudu), a také dojde ke vzniku optického rozhraní odrážejícího vznikající záření zpět do aktivní oblasti, místo jejich rozptýlení v substrátu přeměnou na teplo.

### 1.3. Princip superluminiscenčních diod

Superluminiscenční diody na rozdíl od diod laserových neobsahují zpětnou vazbu, naopak hrany polovodiče mají úmyslně sníženou odrazivost krajních ploch tak, aby byly všechny Fabry-Perotovy rezonance potlačeny [8]. Tím je úmyslně rozšířeno spektrum záření, jeho výkon je ale obdobný, či dokonce vyšší než u laserů (odrazem fotonů nežádoucí polarizace a jejich pohlcením u laserových diod může mimo zpětnou excitaci dojít k ohřátí materiálu – superluminiscenční diody mají vyšší účinnost). V dalších částech práce bude popis zaměřen spíše na zapojení s laserovou diodou, neboť její řízení je mírně komplikovanější a nahrazení diodou superluminiscenční nezpůsobí komplikace. V obráceném případě by mohlo dojít k problémům s řízením (poddimezování parametrů obvodu).

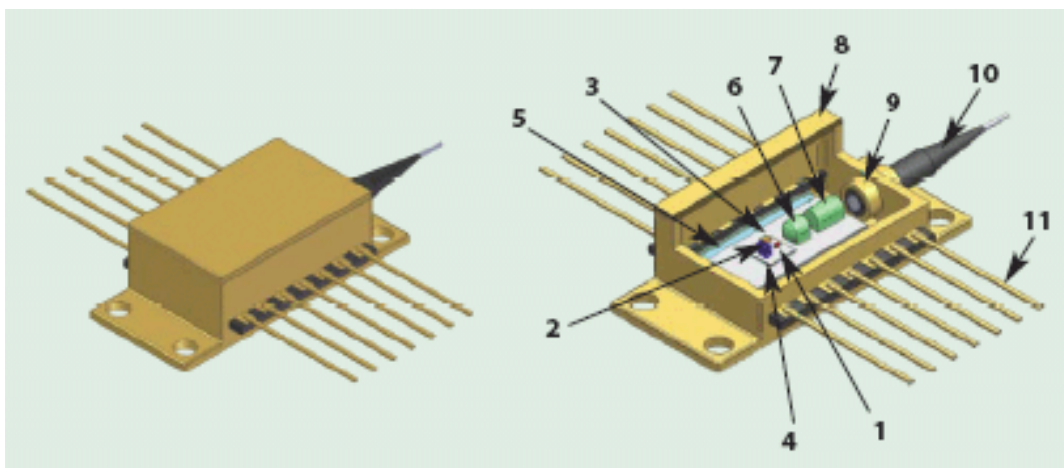
## 2. Možnosti řízení laserové diody

Vzhledem k výše uvedeným vlastnostem polovodičových laserů je nutné při jejich řízení dbát určitých pravidel. Výstupní optický výkon laserových diod je silně závislý na amplitudě protékajícího proudu přechodem, kde dochází k zářivé rekombinaci nosičů a tedy ke vzniku světla. Protéká-li přechodem malý proud řádově v jednotkách až desítkách miliampér, vzniká pouze spontánní emise fotonů a nejedná se tedy o laserové záření. Při zvýšení proudu nad prahovou hodnotu  $I_{TH}$  dojde ke změně charakteru záření, začne převládat stimulovaná emise a dioda začne pracovat v laserovém režimu. Z toho vyplývá, že chceme-li, aby záření laserové

diody (dále jen „LD“) bylo koherentní, je nutné zajistit kontinuální průchod proudu. Je také zřejmé, že pro stabilitu výstupního výkonu je potřebné, aby nedocházelo v průběhu proudu k zákrmitům či výkyvům.

Chceme-li optickým signálem přenášet data, potřebujeme signál dvoustavové charakteristiky, tedy výstup střídavě vypnutý a zapnutý. Postačuje nám tak modulovat signál v čase podle příchozích vstupních dat (obvykle je vyžadována velmi vysoká rychlost změn neboli vysoká datová propustnost), úroveň intenzity paprsku v logickém stavu jedničky a nuly mohou zůstat konstantně nastavené v závislosti na médiu, ve kterém se má paprsek šířit, a na vzdálenosti zdroje a cíle. Pro přesná měření může být vyžadováno řízení jak v časové ose (od kontinuálního režimu po obdélníkový střídavý signál o značné frekvenci, včetně možnosti změny jeho střidy), tak řízení amplitudy signálu, a to i během měření.

V neposlední řadě je charakteristika záření LD silně závislá na teplotě přechodu – se vzrůstající teplotou ubývá zářivých rekombinací, a tudíž dochází k poklesu výkonu výstupního záření. To znamená, že kromě regulace proudu je nutné vhodně řídit i teplotu LD. Mimo chlazení diody při provozu, můžeme chtít i nastavení nominální teploty před započítáním vysílání paprsku.



**Obrázek 5:** Možný typ zapouzdření laserové diody. V pouzdře typu Butterfly je integrován čip LD (1), snímací fotodioda (2) a termistor (3) na společné podložce (4), dále je v pouzdře termočnáněk (5), soustava optických členů (6, 7) a výstup na optické vlákno (9, 10). Celá komponenta je zapouzdřena v kovovém pouzdře (8) a připojena plochými vývody (11) [9].

### 3. Popis zapojení optického zdroje

Celkovou realizaci optického zdroje je možné rozdělit do jednotlivých funkčních bloků. Příklad uspořádání optického zdroje je uveden v blokovém schématu v příloze A. Následující část práce se zabývá popisem jednotlivých bloků z hlediska funkcionality a jsou uvedeny i návaznosti jednotlivých bloků v rámci celku.

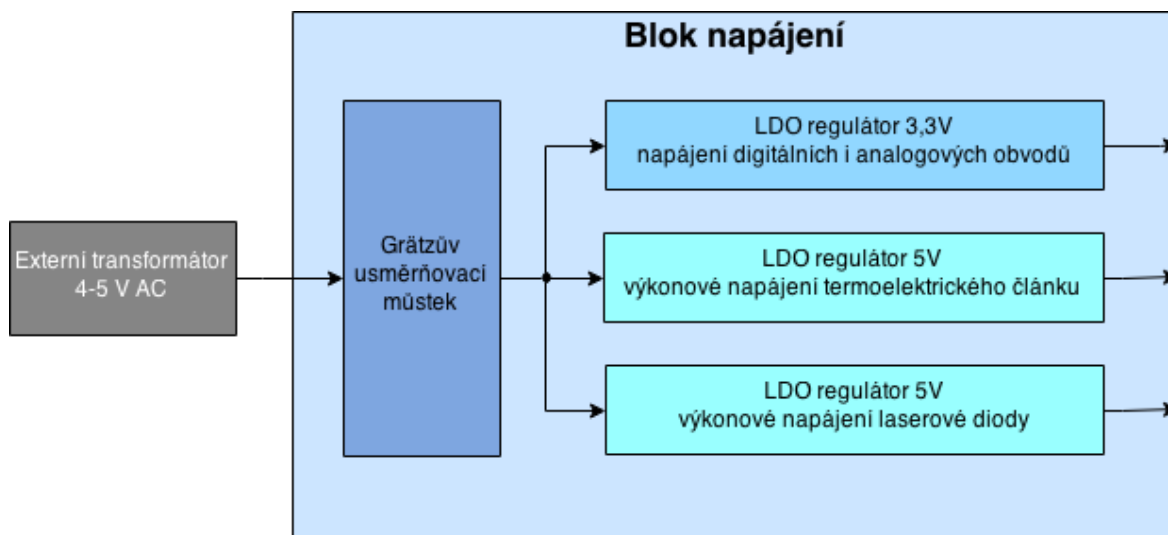
#### 3.1. Blok napájení

V celém zapojení se nachází několik napájecích větví určených pro různé části obvodu. Strukturu modulu znázorňuje blokové schéma na obrázku 6.

Jak již bylo zmíněno, LD je řízena proudem a musíme tedy mít dostatečně „tvrdý“ (při zvyšování proudového odběru, a to i skokově, nedochází k poklesu napětí) napájecí zdroj schopný pokrýt proudové impulzy způsobené jejím spínáním (první napájecí větev).

Druhá napájecí větev slouží pro napájení obvodu řízení teploty. K těmto účelům se v obvodech s laserovými diodami využívá Peltierova článku. Výkon chlazení, případně ohřívání, je regulován za pomoci pulzně šířkově modulovaného napětí přivedeného na jeho vstupy, tedy pulzního proudu obou polarit, jím protékajícího. Z toho plyne, že i zde musí být použit zdroj konstantního napětí, který je schopný dodávat dostatečný proud od kontinuálního průběhu (vysoký výkon chlazení/topení) až po úzké obdélníkové pulzy.

Obě výše zmíněné větve napájení sloužící jak ke spínání LD, tak termoelektrického článku, nesmí ovlivnit napájení pro řídicí logiku, modulační a řídicí obvody a další části zapojení. V celém obvodu se nachází směs analogových a digitálních řídicích signálů, a pro převod mezi nimi slouží digitálně analogové (dále jen „DA“) a analogově digitální (dále jen „AD“) převodníky. Oba typy převodníků vyžadují pro svou činnost zdroje srovnávacích napětí, jejichž hodnota musí být v čase konstantní. K zajištění těchto napětí se používají jak interní, zabudované uvnitř složitějších obvodů, tak přídatné referenční zdroje. Ty mohou být náchylné na rychlé změny či větší výkyvy vstupního napětí. Proto není třetí větev společná ani s jednou z předchozích.



**Obrázek 6:** Blokové schéma napájecího bloku.

Všechny tři větve jsou napájeny jediným usměrněným napětím vyfiltrovaným za pomoci kondenzátoru. Kromě odstranění případných špiček přicházejících ze sítě může dostatečně velký (ve smyslu jeho kapacity) kondenzátor pokrývat i odběrové špičky kterékoliv větve. Pro usměrnění transformovaného napětí (je předpokládáno využití toroidního síťového transformátoru) bylo zvažováno využití řízeného tranzistorového usměrňovače namísto klasického Grätzova zapojení čtyř diod, bohužel vhodný integrovaný obvod pro spínání tranzistorů v usměrňovači nevyhovuje požadavku nízkého napětí (uvažován byl konkrétně obvod LT4320 od společnosti Linear Technology, ten ale bezproblémově funguje až od 9 V [10]). Řízené usměrňovače disponují několika výhodami, jako je například velmi vysoká účinnost – při použití polem řízených tranzistorů je úbytek napětí na usměrňovači velice malý, klidně i jednotky miliampér (použijeme-li MOSFET tranzistory s velmi nízkým odporem v sepnutém stavu  $R_{DS(on)}$ ), a tím i ztráty způsobené průtokem proudů jsou nízké. Další výhodou je eliminace průtoku záporných špiček za usměrňovač (tranzistory jsou vypínány v nule, na rozdíl od diod, u kterých čas rekombinace náboje na přechodu způsobuje krátký zámkit i ze záporné části půlplny střídavého signálu). Jak již bylo zmíněno, tento obvod pracuje až od 9 V vstupního napětí, a kdyby tomu byl přizpůsoben vstup, došlo by ke vzniku velkých výkonových ztrát na dalších stabilizačních obvodech a tím k převaze nevýhod. Z těchto důvodů byl nakonec zvolen klasický diodový můstek v integrovaném provedení od společnosti Vishay

General Semiconductor, konkrétně GSIB620N [11], jenž umožňuje v případě potřeby průchod dostatečně velkým proudům a zároveň má relativně nízkou hodnotu úbytku napětí v propustném směru.

Pro stabilizaci napětí na konstantní hodnoty pro jednotlivé, výše zmíněné, větve byly použity lineární regulátory napětí. Přestože jejich účinnost je nízká, je jejich použití výhodné, obzvláště není-li rozdíl vstupního a výstupního napětí příliš veliký. Na rozdíl od spínaných měničů totiž nevnašejí do obvodů žádné vysokofrekvenční střídavé složky. Jako vhodné lineární regulátory (anglicky low down regulator, odtud zkratka „LDO“) byly vybrány odvozy z řady BA\*\*DD0T od společnosti ROHM semiconductor [12], konkrétně dvakrát obvod BA50DD0T pro 5 V větve napájení laserové diody a Peltierova článku a jeden BA33DD0T pro napájení řídicí části 3,3 V napětím. Tato řada disponuje následujícími vlastnostmi: maximální výstupní proud je 2 A, což bohatě postačuje i pro nejvyšší uvažované stavy, malý úbytek napětí (je možné použít nízké vstupní napětí a tím omezit výkonovou ztrátu na LDO) a obsahem několika interních ochranných obvodů, jako například ochranu proti nadproudu, přehřátí a další. Zvolené LDO mají obvyklé rozložení nožiček a standardizované pouzdro TO-220, respektive TO-220FP, což umožňuje jejich případnou záměnu za model nižší výkonnosti (cenově výhodnější) za předpokladu nižších požadavků na provoz, nebo LDO od jiného výrobce. Regulátory nemohou pracovat samostatně a pro svůj provoz vyžadují několik doplňujících prvků. V základu je to dvojice keramických kondenzátorů o kapacitě alespoň 100 nF připojených co nejbližší k samotnému regulátoru mezi vstupní respektive výstupní svorku a zemní vodič, jenž slouží k pokrytí krátkých výkyvů a tím brání rozkmitání regulačních prvků v obvodu. Dalším doplňkem je ochranná dioda zapojená mezi výstup a vstup LDO, sloužící pro případný průtok zpětných proudů, který by regulátor zničil. Pro filtraci větších výkyvů bylo zapojení doplněno o další dvojici elektrolytických kondenzátorů paralelně připojených pro každý regulátor k výše zmíněným, a také o feritovou perličku oddělující jednotlivé větve napájení. Všechny zmíněné prvky slouží k co nejlepšímu odfiltrování střídavých složek vzniklých ať už fluktuacemi sítě, tak změnou odběru v zařízení.

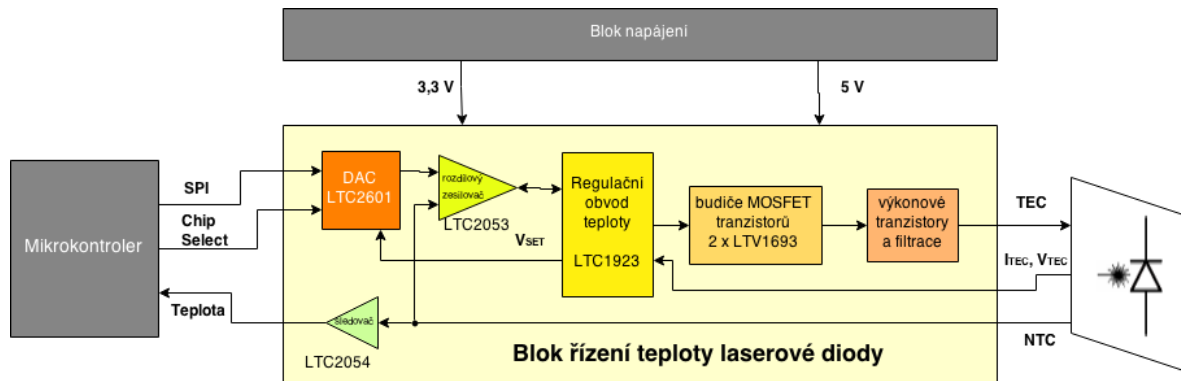
### 3.2. Blok řízení teploty

Jedna z klíčových částí zapojení je část zabývající se stabilizací teploty laserové diody při jejím provozu. Jak bylo nastíněno v dříve, na teplotě polovodičového přechodu silně závisí vyzářený optický výkon LD. Ke chlazení je využíván termoelektrický článek založený na Peltierově jevu, kdy průtokem proudu rozhraním dvou různých kovů dochází k ochlazení jednoho vodiče (jedné strany článku) a k ohřívání druhého [13]. Lze tak účinně chladit konkrétní místo a teplo odvádět směrem k pasivnímu chladiči, s výhodou možné regulace výkonu chlazení případně zahřívání a i výsledné teploty zařízení. Obrázek 7 ukazuje Peltierův článek v samostatném provedení.



Obrázek 7: Příklad Peltierova termoelektrického článku [13].

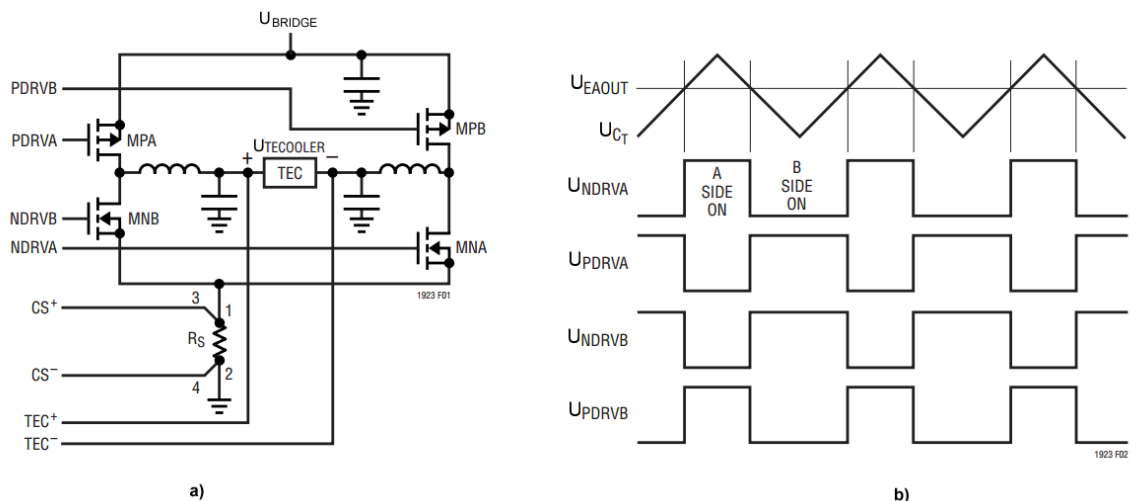
Jako vhodný způsob realizace tohoto bloku bylo zvoleno zapojení se specializovaným obvodem určeným pro tyto účely od společnosti Linear Technology, LTC1923 [2]. Zapojení vychází z doporučené aplikace uvedené na stránkách výrobce [14]. Vzhledem ke zvoleným napájecím úrovním bylo nutné rozšířit zapojení o budiče výkonových MOSFET tranzistorů spínajících proud Peltierovým článkem, a dále také o několik napěťových dělicích můstků a ochranných diod pro případ překročení dovolených napětí na vstupech řídicího obvodu.



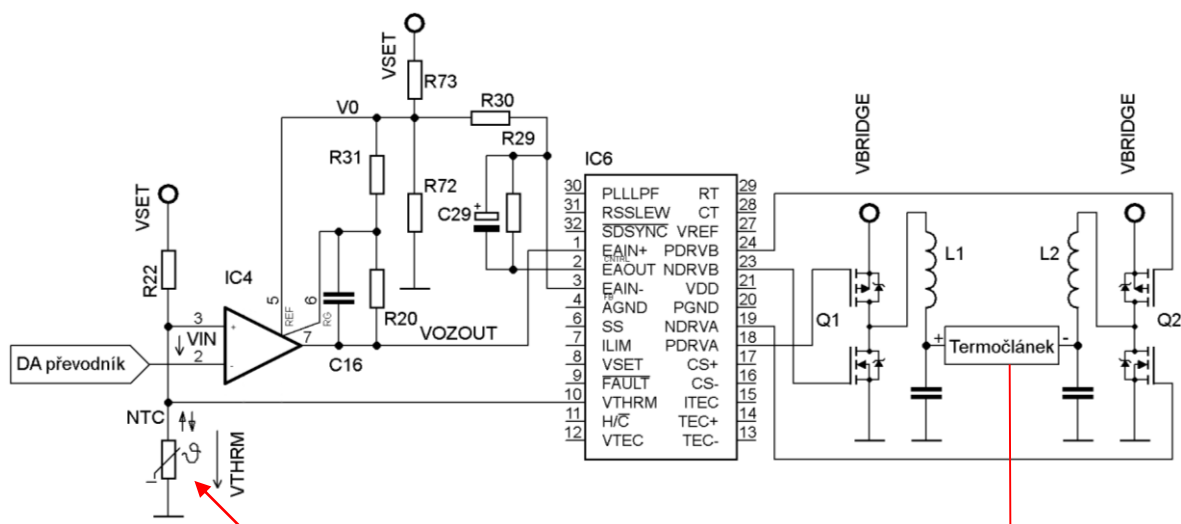
**Obrázek 8:** Blokové schéma zapojení pro řízení teploty laserové diody.

Funkce bloku uvedeného na obrázku 8 lze popsat následovně. Obvod řízení teploty laserových diod LTC1923 je budič pulzně šířkové modulace výkonových MOSFET tranzistorů v H-můstkovém zapojení. Průtok proudu Peltierovým článkem tak může být obousměrný čímž je umožněno jak chlazení, tak ohřev LD. Směr protékajícího proudu závisí na kombinaci sepnutých tranzistorů v můstku. Integrovaný obvod porovnává napětí zesílené vstupním zesilovačem označeným jako chybový zesilovač (z anglického Error amplifier, odtud zkratka „EA“) s interním pilovitým napětím. Je-li výstupní napětí interního zesilovače ( $U_{EAOUT}$ ) vyšší než napětí pily ( $U_{CT}$ ), jsou sepnuty tranzistory větve B (tranzistory MNB a MPB, viz obrázek 9 a)) termočlánek diodu zahřívá. Jsou-li úrovně těchto napětí v opačném vztahu, termočlánek diodu chladí (proud protéká tranzistory MPA a MNA, tedy větvi A na obrázku 9 a)). Je-li napětí EV na úrovni, jak je naznačeno na obrázku 9 b), střídá se směr průtoku proudu každou půlperiodou pilovitého signálu. Díky filtračním tlumivkám a kondenzátorům však výsledný průběh proudu neodpovídá přímo obdélníkovému průběhu spínání tranzistorů (respektive jejich větví), ale dochází k jeho ustálení na střední hodnotě. Poměrem časů, kdy proud teče jednotlivými směry, můžeme regulovat výsledný chladicí/ohřívací výkon Peltierova článku. Jelikož spínáme střídavě obě větve (takzvané bipolární buzení zátěže), dochází ke konstantnímu zatížení zdroje a nevznikají na něm proudové nárazy. Ve svém důsledku to znamená sice nižší účinnost, ale zato nízké rušení napájení.

Regulace teploty probíhá v uzavřené regulační smyčce naznačené na obrázku 10. Ta se skládá z termoelektrického článku jakožto akčního členu, termistoru snímajícího aktuální teplotu, převádějící ji na napětí, rozdílového zesilovače ( $IC_4$ , obvod LTC2053, výrobce: Linear technology [15]), který zesiluje rozdíl mezi napětím na termistoru a napětím určujícím požadovanou teplotu a nakonec samotným regulačním obvodem  $IC_6$  – LTC1923. Nastavení žádané teploty je v uváděném zapojení řešeno převodem z digitálního signálu na analogovou úroveň za pomoci DA převodníku, jinak je možné použít potenciometr zapojeným mezi zdroj referenčního napětí a zem a nastavení řešit manuálně.



**Obrázek 9:** Zjednodušené schéma zapojení tranzistorového H-můstku napájecího termočláneku (a) a průběhy napětí v regulačním obvodu (viz text) (b). [2]



**Obrázek 10:** Zjednodušené zapojení regulačního obvodu znázorňující regulační smyčku.

Máme-li LD s termistorem o nominální hodnotě  $R_{\text{THRM}} = 10 \text{ k}\Omega$  při teplotě  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  [16], v okolí pracovního bodu má přibližnou strmost napětí  $\frac{\Delta U_{\text{THRM}}}{\Delta T} \cong -30 \text{ mV} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \equiv K_{\text{THRM}}$ , a uvažujeme-li teplotní toleranci diody  $\Delta\vartheta = 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ , pak můžeme určit maximální chybové napětí  $U_E$ :

$$U_E = \left| \frac{\Delta U_{\text{THRM}}}{\Delta T} \right| \cdot \Delta\vartheta = 30 \cdot 10^{-3} \cdot 0,01 = 300 \text{ } \mu\text{V}. \quad (1)$$

Následně pak můžeme určit zesílení celé regulační smyčky:

$$K_R = \frac{U_{\text{THRM}}}{V_E} + 1 = \frac{1,25}{300 \cdot 10^{-6}} + 1 \cong 4167, \quad (2)$$

kde  $U_{\text{THRM}}$  je napětí na termistoru pro teplotu  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Dále vyjádříme přenos rozdílového zesilovače  $K_{IA}$  a interního vstupního zesilovače řídicího obvodu ( $K_{EA}$ ):

$$K_{IA} \cdot K_{EA} = \frac{K_R}{K_{MOD} \cdot K_{PWR} \cdot K_{TEC} \cdot K_{THRM}} = \frac{4167}{6,6 \cdot 20 \cdot 0,03} \cong 1052, \quad (3)$$

kde  $K_{MOD}$  je přenos modulátoru,  $K_{PWR}$  je zesílení koncového regulačního členu v integrovaném obvodu, výrovce udává, že platí:

$$K_{MOD} \cdot K_{PWR} = 2 \cdot U_{NAP} = 2 \cdot 3,3 = 6,6, \quad (4)$$

kde  $U_{NAP}$  je velikost napájecího napětí ve voltech;  $K_{TEC}$  je zisk termistoru udávaný výrobcem, například  $K_{TEC} = 20 \text{ }^\circ\text{C}/(1 \text{ V})$ . Pro zajištění dostatečné rezervy je výsledek zaokrouhlen na přibližně 1,5 násobek vypočítané hodnoty, tedy na  $K_{IA} \cdot K_{EA} = 1500$ .

Aby nedocházelo k přílišnému zesilování chyby vzniklé tolerancí termistoru, volíme přenos rozdílového zesilovače  $K_{IA} \cong 10$ . Z toho plyne, že zesílení EA musí být:

$$K_{EA} = \frac{K_{IA} \cdot K_{EA}}{K_{IA}} = \frac{1500}{10} = 150. \quad (5)$$

Chybový zesilovač je zapojený jakožto neinvertující zesilovač a můžeme jeho zesílení nastavit zpětnovazebními rezistory (viz [17]) zapojenými mezi výstupem  $EAOUT$ , invertujícím vstupem  $FB$  a zemí, respektive potenciálem  $U_0 = 1 \text{ V}$ . Úroveň 1 V posouvá výstup o stejnosměrnou složku (tzv. „offset“) při nulovém požadovaném výkonu chlazení/topení právě na tuto hodnotu, která zároveň odpovídá polovině pilovitého napětí modulátoru, neboli 50 % střídě PWM výstupu a žádnému výkonu článku (napětí je získáno odporovým děličem z rezistorů  $R_{72}^1$  a  $R_{73}$  připojených na zdroj referenčního napětí). V zapojení jsou rezistory nastavující zesílení EA značeny jako  $R_{29}$  a  $R_{30}$ , jejich výpočet je následující (hodnota  $R_{29} = 10 \text{ M}\Omega$  byla zvolena z řady v závislosti na kombinaci s kondenzátorem, se kterým vytváří RC článek zabraňující rozkmitání regulátoru, výpočet uveden níže (7)). Výpočet je zjednodušen (je zanedbán offset, který způsobuje nelinearitu zesílení a velmi komplikuje výpočet, to se projeví mírným zkreslením průběhu výkonu chlazení, nikoliv však v přesnosti dosažené teploty) a výsledek je zaokrouhlen na běžně dostupnou řadovou hodnotu:

$$K_{EA} = \frac{R_{29}}{R_{30}} + 1 \Rightarrow R_{30} = \frac{R_{29}}{K_{EA} - 1} = \frac{10 \cdot 10^6}{150 - 1} \cong 68 \text{ k}\Omega. \quad (6)$$

Ve zpětné vazbě je navíc umístěn kondenzátor ( $C_{29}$ ), který s rezistorem ( $R_{29}$ ) tvoří rezonanční článek, jenž zvyšuje stabilitu regulace. Menší nevýhodou je zvětšení reakčních časů, to ale není při běžném provozu na škodu. Výrobce doporučuje zvolit časovou konstantu  $\tau$  minimálně v řádu desítek sekund [2]. Z této volby následně můžeme vypočítat kapacitu kondenzátoru (výsledek zaokrouhlen na řadovou hodnotu):

$$C_{29} = \frac{\tau}{R_{29}} = \frac{50}{10 \cdot 10^6} = 5 \cdot 10^{-6} \approx 4,7 \text{ }\mu\text{F}. \quad (7)$$

Jak již bylo řečeno, zesílení vstupního rozdílového zesilovače by mělo být alespoň  $K_{IA} = 10$  [2] a pro jeho nastavení je taky využito zapojené zpětné vazby, tentokrát z rezistorů  $R_{20}$  a  $R_{31}$ . Jejich výpočet vychází ze vztahu uvedeného výrobcem operačního zesilovače

<sup>1</sup> Poznámka: Všechny dále uvedené součástky odpovídají součástkám ve schématu uvedeném v příloze B.

v katalogovém listu [15] a hodnoty jsou spočítané pro maximální předpokládané rozdílové napětí  $U_{OZIN} = 1,25$  V:

$$K_{IA} = \frac{U_{OZOUT}}{U_{OZIN}} = \frac{(1 + \frac{R_{20}}{R_{31}}) \cdot U_{OZIN} + U_O}{U_{OZIN}} \cong 10, \quad (8)$$

$$\frac{R_{20}}{R_{31}} = \frac{K_{IA} \cdot U_{OZIN} - U_O}{U_{OZIN}} - 1 = \frac{10 \cdot 1,25 - 1}{1,25} - 1 = 8,2. \quad (9)$$

Pro kompenzaci chyb vzniklých tolerancemi součástek je namísto obou rezistorů navrhnut v zapojení jediný odporový trimr, jehož hodnota bude nastavena při ožívování přibližně ve spočítaném poměru, ale hlavně tak, aby zařízení pracovalo co nejspolehlivěji (nutno prověřit při zahoření výrobku).

Mimo samotnou regulaci teploty obstarává integrovaný obvod za pomoci specializovaných vstupů dohled nad dalšími parametry, jakými jsou například proud Peltierovým článkem, maximální přípustné napětí na článku, kontrola termistoru (v případě jeho zkratu či přerušeni dojde k odpojení obvodu), zda není článek zkratovaný, či odpojený.

Zásadní parametr pro správnou funkci chlazení je maximální přípustný proud tekoucí Peltierovým článkem. Tento proud je jasně stanoven v katalogu konkrétní diody či vlastního článku a při jeho překročení hrozí článku zničení. Omezení proudu je v obvodu řešeno prostým měřicím bočnickem proudu umístěným mezi záporné napájení obou větví můstku a zemí. Známe-li maximální proud z katalogu (kupříkladu  $I_{LIMIT} = 1$  A [16]), není problém dopočítat potřebnou hodnotu snímacího rezistoru:

$$R_{32} = \frac{150 \cdot 10^{-3}}{I_{LIMIT}} = \frac{150 \cdot 10^{-3}}{1} = 0,15 \Omega. \quad (10)$$

Hodnota limitace se nastaví dalším odporovým děličem připojeným na vstup  $I_{LIM}$ :

$$I_{LIMIT} = \frac{0,15 \cdot R_{26} \cdot U_{SET}}{(R_{26} + R_{34}) \cdot R_{32}} \Rightarrow \frac{I_{LIMIT} \cdot R_{32}}{U_{SET} \cdot 0,15} = \frac{R_{26}}{(R_{26} + R_{34})} = \frac{1 \cdot 0,15}{0,15 \cdot 2,5} = 0,4. \quad (11)$$

Z toho lze dopočítat  $R_{26} = 10$  k $\Omega$  a  $R_{34} = 15$  k $\Omega$ .

Výrobce také uvádí možnost, jak v případě potřeby zajistit rozdílnou limitaci pro chlazení a topení. V navrhovaném řešení realizaci toto omezeno nebude, maximální chladicí/zahřívací může být řízen programově (aktuální proud protékající článkem je také převáděn na napětí ve voltech na výstupu  $I_{TEC}$ , jehož hodnota odpovídá:

$$U_{ITEC} = 10 \cdot (I_{TEC} + I_{RIPPLE}) \cdot R_{32}, \quad (12)$$

kde  $I_{RIPPLE}$  je zvlnění proudu v ampérech způsobené modulací.

Další možností integrovaného obvodu (dále jen „IO“), je limitace napětí na článku (opět z důvodu jeho ochrany). Detekce aktuálního napětí na článku je prováděna přivedením obou svorek termočlánku na vstup interního diferenciálního zesilovače. Zde je rozdíl napětí zesílen a výstupem je regulována střída PWM modulace. Z úrovně tohoto napětí je též indikováno, zda je článek právě v režimu topení či chlazení, jeho úroveň je předána na výstup  $V_{TEC}$  pro možnost jeho měření. Maximální hodnota napětí v daném zapojení je posunuta oproti zapojení běžnému, a to z důvodu vyššího napájecího napětí tranzistorů, než je napájení IO. Přepočtení je následující:

$$U_{TECOOLER} = 2,5 \cdot \left(1 + \frac{R_{36}}{R_{38}} + \frac{R_{36}}{10^5}\right). \quad (13)$$

Výrobce doporučuje pro snížení chyby používat odpory do hodnoty 10 k $\Omega$ , a máme-li například článek s maximálním dovoleným napětím  $U_{TECOOLER} = 3$  V, lze dopočítat hodnoty rezistoru  $R_{35} = R_{36} = 1,3$  k $\Omega$  a  $R_{37} = R_{38} = 6,8$  k $\Omega$ .

IO LTC1923 obsahuje ještě několik dalších řídicích, ovládacích či informačních pinů (jako například nastavení frekvence, možnost synchronizace s dalším obvodem, nastavení měkkého rozběhu (takzvaný „soft start“), indikace poruchy), ty už ale nebudou v této práci podrobněji rozebírány, zásadní vliv na chod zařízení totiž nemají.

V bloku řízení teploty se mimo hlavní integrovaný obvod LTC1923 nachází několik dalších, pomocných, kterými jsou  $IC_3$  (digitálně analogový převodník LTC2601 od společnosti Linear technology [18]), zmiňovaný vstupní operační zesilovač  $IC_4$ , dva výkonové můstkové budiče MOSFET tranzistorů  $IC_7$  a  $IC_8$  LTC1693, taktéž od společnosti Linear technology [19] a naposledy operační zesilovač  $IC_5$  (LTC2054 od Linear technology [20]) zapojený jako sledovač napětí na termistoru – měření aktuální teploty mikrokontrolérem). Za zmínku stojí dvojice duálních tranzistorů IRF7389 (výrobce je společnost International Rectifier [21]). Právě tyto tranzistory byly vybrány vzhledem k jejich nízkému přechodovému odporu v sepnutém stavu ( $R_{DS(ON)}$ ), a také vzhledem k vhodným napěťovým úrovním potřebným k jejich sepnutí. Aby Peltierovým článkem tekla kontinuální proud, je jeho spínání filtrováno za pomoci LC článků na obou jeho stranách. Výpočet prvků filtru je možné provést následovně:

$$L_1 = L_2 = \frac{U_{BRIDGE}^2 - U_{TEC}^2}{4 \cdot f_{OSC} \cdot \Delta I_L \cdot U_{BRIDGE}} = \frac{5^2 - 1,8^2}{4 \cdot 230 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 5} \cong 95 \mu\text{H}, \quad (14)$$

$$C_{34} = C_{35} = \frac{U_{BRIDGE}^2 - U_{TEC}^2}{(16 \cdot f_{OSC}^2 \cdot \Delta I_{TEC} \cdot L_1 \cdot U_{BRIDGE} \cdot R_{TEC}) - (8 \cdot f_{OSC} \cdot R_{ESR} \cdot (U_{BRIDGE}^2 - U_{TEC}^2))} = \frac{5^2 - 1,8^2}{(16 \cdot 230000^2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 95 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 1,8) - (8 \cdot 230000 \cdot 0,025 \cdot (5^2 - 1,8^2))} \cong 3,5 \mu\text{F}. \quad (15)$$

Ve výpočtech jsou tyto proměnné:

$U_{TEC} = 5$ V	nominální napětí na termočlátku
$f_{OSC} = \frac{0,75}{R_{33} \cdot C_{21}} = \frac{0,75}{10 \cdot 10^3 \cdot 330 \cdot 10^{-12}}$ $\cong 230$ kHz	frekvence PWM modulace
$\Delta I_L = 50$ mA	požadované zvlnění proudu tlumivkou
$U_{BRIDGE} = 5$ V	napájecí napětí H-můstku
$\Delta I_{TEC} = 10$ mA	požadované zvlnění proudu termočlánkem
$R_{TEC} = 1,8$ $\Omega$	nominální odpor termočlátku
$R_{ESR} = 25$ m $\Omega$	typická hodnota sériového parazitního odporu kondenzátorů

Obojí zvlnění nejsou pro chod zařízení nijak podstatné, a proto je možné hodnoty obou prvků zaokrouhlit, případně pozměnit za vhodné řadové hodnoty, či dokonce je změnit v závislosti na požadavcích.

Nastavení teploty je realizováno poměrem napětí na termistoru a vstupního (analogového) napětí. Toto vstupní napětí je přivedeno z DA převodníku, protože celé řízení zapojení je provedeno digitálně. Za převodník byl zvolen zmíněný obvod LTC2601. Jedná se o nízkopříkonový 16bitový převodník v plném rozsahu vstupního referenčního napětí (výstup

dosahuje rozsahu od téměř 0 až skoro do napájecího napětí (přesněji 0,4 až 2,9 V při napájení 3,3 volty [18]), takzvaný „rail-to-rail“ provoz). Vstup do převodníku z mikrokontroléru je řešen za pomoci 3vodičové sériové komunikační sběrnice. Dva z vodičů slouží pro samotnou komunikaci na standardu SPI (zkratka z anglického Serial Peripheral Interface) – jeden vodič pro časování (*SCK*), druhý pro sériový synchronní tok dat (*SDI*). Poslední z vodičů slouží pro výběr konkrétního periferního čipu, s nímž bude probíhat komunikace (tzv. „Chip Select“; je veden pro každý připojený integrovaný obvod zvlášť, aktivní v logické úrovni 0). Podrobnější popis sériové komunikace bude uveden v části 6.1 této práce. Výstupní napětí DA převodníku odpovídá následující rovnici:

$$U_{\text{DAOUT}} \cong \frac{k}{2^{16}} \cdot U_{\text{SET}}, \quad (16)$$

kde  $k$  odpovídá desítkovému tvaru vstupního digitálního čísla.

### Návrh nastavení napětí pro požadavek skokové změny teploty:

Bude uvažován termistor o nominální hodnotě  $R_{\text{THRM0}} = 10 \text{ k}\Omega$  při teplotě  $\vartheta_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , Steinhart-Hartovy koeficienty (charakterizující změnu rezistivity vůči změně teploty polovodičového termistoru) jsou  $A = 1,1292 \cdot 10^{-3}$ ,  $B = 2,3411 \cdot 10^{-4}$  a  $C = 8,7755 \cdot 10^{-8}$  [16]. Předpokládaná původní teplota diody je  $\vartheta_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  a je vyžadováno její ochlazení na  $\vartheta_2 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nejprve jsou spočítány hodnoty odporu termistoru pro původní ( $R_{\text{THRM1}}$ ) a žádanou ( $R_{\text{THRM2}}$ ) teplotu. Pro tento výpočet je využita Steinhart-Hartova rovnice [22]:

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R_{\text{THRM}}) + C \cdot (\ln(R_{\text{THRM}}))^3, \quad (17)$$

kde koeficienty  $A$ ,  $B$ , a  $C$ , jsou Steinhart-Hartovy koeficienty specifické pro daný termistor, a  $T$  je teplota termistoru v kelvinech.

Řešením složité exponenciálně-kubické rovnice lze vyjádřit:

$$R_{\text{THRM}} = e^{\sqrt[3]{\left(\frac{B}{3C}\right)^3 + \left(\frac{1}{C}\left(\frac{A-1}{T}\right)\right)^2 - \frac{1}{C}\left(\frac{A-1}{T}\right)} - \sqrt[3]{\left(\frac{B}{3C}\right)^3 + \left(\frac{1}{C}\left(\frac{A-1}{T}\right)\right)^2 + \frac{1}{C}\left(\frac{A-1}{T}\right)}}. \quad (18)$$

Dosazením do této rovnice (za pomoci výpočetní techniky) vyjde:  $R_{\text{THRM1}} \cong 8056 \text{ k}\Omega$  a  $R_{\text{THRM2}} \cong 15714 \text{ k}\Omega$ . Tomu odpovídají úbytky napětí na děliči z termistoru a rezistoru  $R_{22}$  následovně:

$$U_{\text{THRM}} = U_{\text{SET}} \cdot \frac{R_{\text{THRM}}}{R_{\text{THRM}} + R_{22}}, \quad (19)$$

Konkrétní vypočítaná napětí jsou  $U_{\text{THRM1}} \cong 1,115 \text{ V}$  a  $U_{\text{THRM2}} \cong 1,528 \text{ V}$ . Výsledné teplotě odpovídá napětí na termistoru a zároveň výstupní napětí DA převodníku  $U_{\text{DAOUT}} = U_{\text{THRM2}}$  a jeho vstupní nastavení je snadno dopočitatelné:

$$k \cong \frac{U_{\text{DAOUT}}}{U_{\text{SET}}} \cdot 2^{16} = \frac{1,528}{2,5} \cdot 2^{16} \cong (40056)_{\text{DEC}} \equiv (100111000111000)_{\text{BIN}}. \quad (20)$$

Zda opravdu dochází k intenzivnímu chlazení, se ověří následovně: nejprve je spočítáno napětí na výstupu rozdílového zesilovače (rozmezí výsledku zaokrouhlíme do mezí daných napájením (saturace rail-to-rail zesilovače)), následně se dopočítá napětí na výstupu EA (opět zaokrouhlíme do výše zmíněných mezí), a při srovnání s pilovitým napětím modulátoru (jeho minimální a maximální úrovně jsou dle výrobce 0,5 a 1,5 V) je možné stanovit intenzitu chlazení.

$$\begin{aligned}\frac{K_{IA}}{U_{OZIN}} = U_{OZOUT} &= \left(1 + \frac{R_{20}}{R_{31}}\right) \cdot U_{OZIN} + U_O = \left(1 + \frac{R_{20}}{R_{31}}\right) \cdot (U_{THRM1} - U_{DAOUT}) + U_O = \\ &= \left(1 + \frac{8,2}{1}\right) \cdot (1,115 - 1,528) + 1 = -2,7996 \doteq 0 \text{ V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{EAOUT} &= \left(1 + \frac{R_{29}}{R_{30}}\right) \cdot U_{OZOUT} - \frac{R_{29}}{R_{30}} \cdot U_O = \left(1 + \frac{10^7}{68 \cdot 10^3}\right) \cdot 0 - \frac{10^7}{68 \cdot 10^3} \cdot 1 \cong -147 \\ &\doteq 0 \text{ V}\end{aligned}$$

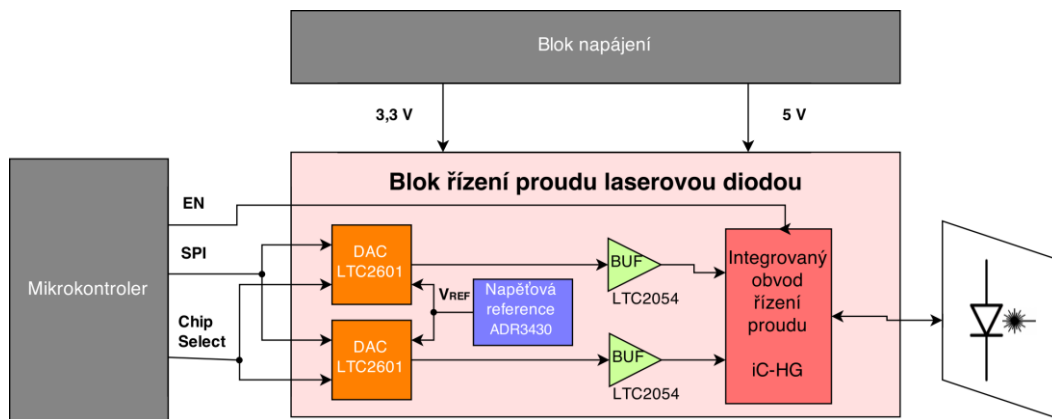
Jak je vidět, výsledné napětí je menší než spodní mez pilovitého průběhu, což znamená (za předpokladu, že nedochází k omezení proudu či napětí na článku), že je proud propouštěn pouze tranzistory větve A (viz obrázek 9), a dochází pouze ke chlazení.

### 3.3. Blok řízení proudu laserovou diodou

Nejpodstatnější částí celé realizace obvodu je tento blok, jenž umožňuje přesnou stabilizaci kontinuálního proudu laserovou diodou, respektive opakovatelnost proudových pulzů při pulzním režimu. Jak bylo naznačeno v předchozích kapitolách, vyzářený optický výkon LD je silně závislý mimo jiné na proudu protékajícím přechodem v polovodiči. Při malých hodnotách proudu obvykle převažuje spontánní emise, záření není koherentní a nedosahuje požadované výkonové hustoty. Po překročení prahového proudu  $I_{TH}$  začne v polovodiči převládat stimulovaná emise a dioda přejde do laserového režimu. Tento princip funkce je podstatný i při návrhu napájení LD. Pracuje-li dioda v kontinuálním režimu (dále jen „CW“, což vychází z anglického continuous wave), musí proud překročit hodnotu  $I_{TH}$ , a dále je možné řízením jeho velikosti je možné relativně přesně regulovat i vyzářený výkon (záleží na stabilitě teploty, jak bylo uvedeno výše). Má-li dioda pracovat v pulzním režimu, tedy tak, aby výstupní optický výkon byl přerušovaný, řízení je mírně komplikováno. Pro dosažení co nejstrmějšího průběhu obdélníkových pulzů světla je vhodné udržovat na diodě kontinuální proud na hranici prahového proudu a v okamžiku pulzu jej zvýšit na požadovanou hodnotu odpovídající laserovému režimu.

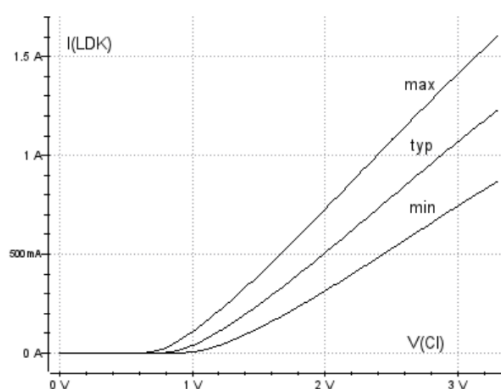
Požadovaných vlastností je možné dosáhnout několika způsoby. Jednou z možností řízení je využití diskretních součástek. Pro řízení kontinuálního proudu je tato možnost vyhovující, i když může být značně neúčinná (regulace velkých proudů bipolárním tranzistorem). Řízení proudových impulzů touto metodou je však velmi problematické. Možností by bylo velice rychlé snímání protékajícího proudu a jeho omezení zpětnovazební smyčkou, hrozí zde ale vznik různých zákmitů, zpoždění či jiných nežádoucích jevů.

Druhou možností je využití specializovaných obvodů pracujících jako nastavitelný zdroj proudu. Obvodů specializujících se na řízení LD je celá řada, z velké části se však jedná o odbody vyhrazené pro optickou komunikaci, u kterých je řízení amplitud proudů (jak kontinuálního, tak pulzního) a i časového průběhu problematické či dokonce nemožné (například obvod společnosti Micrel, SY88952L [23]). Jedním z uvažovaných říditelných obvodů byl integrovaný obvod ADN8810 od výrobce Analog Devices [24]. Tento obvod umožňuje velmi přesné nastavení proudu (realizované digitálně). Problém použití tohoto obvodu je, že není vhodný pro pulzní spínání – jeho reakční časy jsou příliš dlouhé.



**Obrázek 11:** Blokové schéma zapojení řízení proudu laserovou diodou.

Konečnou volbou je jeden z obvodů společnosti iC-Haus. Část produkce této firmy se specializuje právě na řízení laserových diod. Požadavkům na navrhovaný obvod vyhovuje několik obvodů, princip jejich řízení je obdobný. Vždy jsou v obvodu přítomny dva typy vstupů: vstupy typu *CI* sloužící k nastavení proudu laserovou diodou v závislosti na přivedeném napětí a potom vstupy typu *EN*, které slouží pro povolení proudu (pro CW trvale v logické úrovni 1, přepínáním log. 0 a 1 umožňuje pulzní režim). Jednotlivé obvody se liší v maximálním přípustném proudu, které jsou schopné dodávat, a také počtem kanálů (některé umožňují řídit i více LD zároveň). Pro účely zapojení byl vybrán obvod iC-HG [1], který obsahuje tři (diferenciální řízení), respektive až šest kanálů (řízení úrovněmi TTL). Vybrán byl z důvodu dostatečně dimenzovaných proudových výstupů, umožňujících až 500 mA na kanál v kontinuálním režimu (zadaný požadavek je alespoň 300 mA, což ostatní obvody nesplňovaly). Obvod nevyžaduje takřka žádné periferní komponenty, pouze několik blokových kondenzátorů (ochrana proti zakmitání při špičkových odběrech) a pro nastavení režimu spínání (diferenciální či TTL, pro oba režimy je možná rychlá nebo pomalá varianta) se používá napětíového děliče z dvojice rezistorů (v uvažovaném zapojení je rezistory  $R_{74}$  a  $R_{75}$  nastaven režim rychlého TTL spínání, pro který je nastavovací vstup *ELVDS* uzemněn). Poslední doporučenou součástí je rychlá dioda připojená antiparalelně k LD jako ochrana obvodu před zápornými proudovými impulzy vznikajícími na parazitních indukčnostech vedení.



**Obrázek 12:** Převodní charakteristika vstupního napětí na pinu typu CI na výstupní proud (piny typu LDK), pro toleranční rozptyl jednotlivých výrobků [1].

Bohužel, způsob nastavování proudu neumožňuje nastavit jej na přesnou číselnou hodnotu, ale pouze jako bod na převodní charakteristice, která se může lišit kus od kusu – viz obrázek 12. Proto je nutná kalibrace zařízení, či nastavení proudu podle aktuálního výkonu. Nastavení proudu v pulzním režimu ( $I_{pulzní}$ ) je mírně odlišné od režimu kontinuálního. Je-li

nastavení proudu kalibrováno na kontinuální režim, pro impulzy se musí provést následující přepoččet:

$$I_{\text{pulzní}} = I_{\text{CW}} \cdot \sqrt{\frac{T}{t}}, \quad (21)$$

kde amplituda proudu impulzů,  $I_{\text{CW}}$  je proud kontinuálního režimu v ampérech,  $T$  je perioda obdélníkového průběhu, v sekundách a  $t$  je šířka impulzů, taktéž v sekundách.

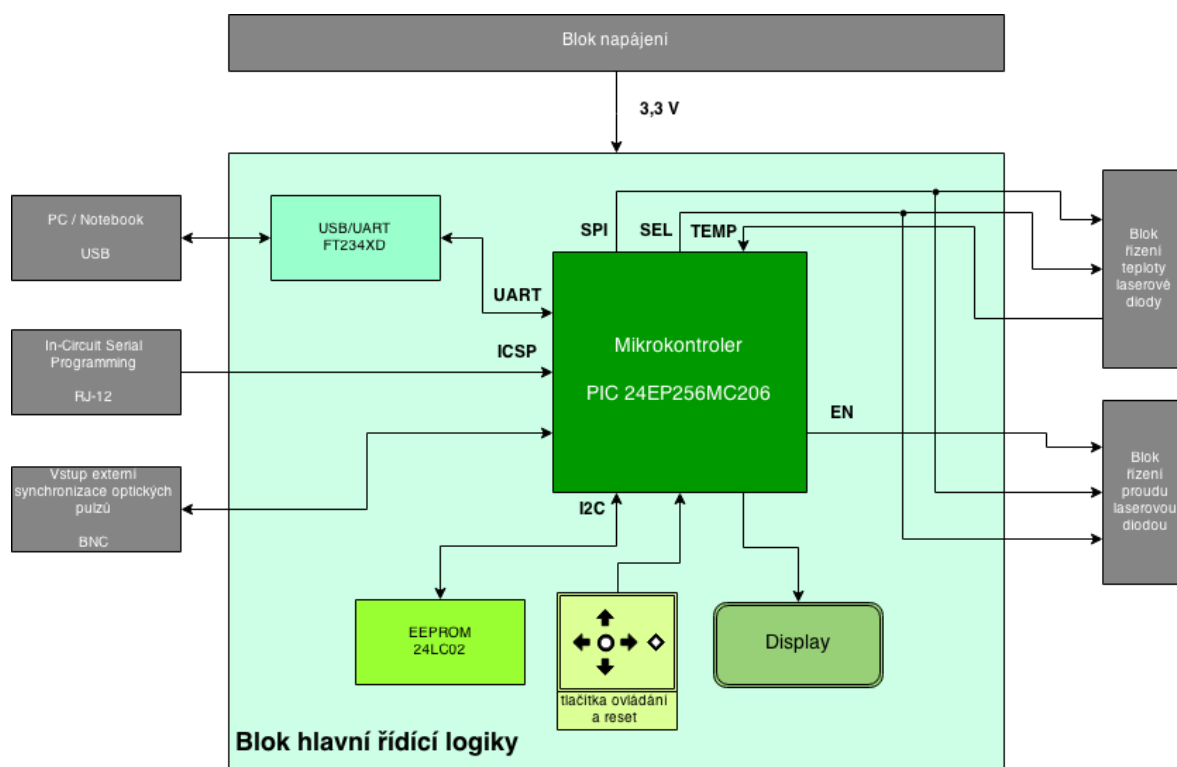
Obdobně jako v předešlé části je i zde (blokové schéma zapojení znázorňuje obrázek 11) využito k řízení digitálních signálů, které však musí být převedeny na analogový tvar. I tady jsou použity DA převodníky LTC2601 [18], řízené po společné sběrnici SPI a přidavnými vodiči Chip Select pro každý převodník. Tyto převodníky vyžadují zdroj referenčního napětí, ke kterému je vztažen výstup. V předchozí části byl zdroj tohoto napětí integrován v obvodu regulace teploty, zde musí být přidán externě. Byl vybrán integrovaný zdroj referenčního napětí 3 V od společnosti Analog Devices, konkrétně obvod ADR3430. Jelikož DA převodníky nejsou schopny dodávat vyšší proud (pouze 7,5 mA při napájení 3,3 volty [25]), jsou za ně zařazeny napěťové sledovače pro posílení výkonu (zapojené dle doporučení výrobce použitého operačního zesilovače LTC2054 [20]).

### 3.4. Blok hlavní řídicí logiky

Jak již bylo několikrát zmíněno, zapojení je kompletně řízeno za pomoci mikrokontroléru a jím generovaných digitálních signálů. Jelikož i řízení pulzů laserovou diodou je tímto obvodem generováno, je zapotřebí mikrokontrolér (dále jen „MCU“) o vysoké frekvenci hodinového signálu. Ze široké nabídky byl vybrán MCU od společnosti Microchip Technology, konkrétně rychlý procesor specializovaný pro řízení motorů PIC 24EP256MC206 [26], jenž disponuje rychlými PWM moduly. Jeden z modulů je využit právě pro pulzní řízení proudu LD, zároveň může být na jeho pomocném vstupu implementován přívod externích synchronizačních PWM pulzů pro možnost jejich spínání například měřičem optických signálů. Mimo to je MCU využit i pro řízení teploty a amplitudy proudu LD (generování digitálních signálů pro DA převodníky), sledování aktuálních parametrů obvodu (teplota, chybové stavy), komunikaci s nadřazeným systémem (v podobě osobního počítače), pro komunikaci s obsluhou za pomoci tlačítek, displeje a indikačních diod, a nakonec i s pamětí sloužící pro uchování nastavených parametrů [27]. Kvůli požadavku na relativně vysokou frekvenci pulzů a jejich malou šířku musí být taktovací frekvence MCU také vysoká – je zvolena taktovací frekvence 100 MHz. Ta je získána z externího mikromechanického generátoru (tzv. MEMS) od výrobce Silicon Labs, konkrétně obvodem 501JCA10M0000CAG [28] (ten dodává pouze 10 MHz), a poté je tato frekvence znásobena za pomoci interního fázového závěsu uvnitř mikrokontroléru (viz kapitola 6.1 část taktování mikrokontroléru). Pro komunikaci s počítačem je použit převodník sériové komunikace UART na standardizovanou sériovou sběrnici USB od specializovaného výrobce FTDI, FT234XD [29]. Celou koncepci modulu naznačuje obrázek 13.

## 4. Návrh konstrukce a desek plošných spojů

Navržené zapojení podle schémat uvedených v přílohách B až E, je nutné převést na rozložení na desce plošných spojů. Celé zapojení bylo fyzicky rozděleno na dvě oddělené desky. Na první z nich se nachází většina z navržených obvodů (dále bude označována jako hlavní deska), na té druhé je displej, tlačítka (jak ovládací, tak tlačítko pro resetování) a indikační diody – dále bude označována jako deska předního panelu nebo jen zkráceně přední panel.



Obrázek 13: Blokové schéma části řízení a komunikace s nadřazenými systémy.

#### 4.1. Hlavní řídicí deska

Hlavní deska (konstrukční návrh jednotlivých vrstev je uveden v příloze F) je realizována jako čtyřvrstvá, přičemž obě vnitřní vrstvy jsou v podobě rozlité mědi, která slouží jako rozvod napájení a země. Z vrchní strany DPS byl umístěn mikrokontrolér, integrovaný obvod LTC1923 pro řízení teploty, a také iC-HG pro řízení proudu Laserovou diodou. Ze spodní strany jsou zapojeny výstupní tranzistory PWM regulátoru napětí na Peltierově článku, filtrační indukčnosti této části zapojení a také převodník sériových sběrnic UART a USB pro komunikaci s počítačem, a také patice pro připojení laserové diody. Umístění této diody ze spodní strany je zvoleno z několika důvodů. Prvním z nich je zajištění lepšího odvodu tepla z pouzdra diody. Dioda je koncipovaná tak, že polovodičový čip je připojen ke spodní straně přes Peltierův článek. Toto teplo je tedy předáváno kovovému pouzdru. Aby mohlo být dále odváděno pryč a nedošlo tak ke zničení diody, je v desce vytvořen otvor, do kterého bude umístěn měděný blok, který odvede teplo na připojený chladič. Aby účinnost chlazení byla co nejvyšší, je tento chladič záměrně umístěn z vrchní strany a ohříváný vzduch tak může volně stoupat. Druhým důvodem je natočení diody tak, aby její výstup směřoval směrem do desky, a to z důvodu ochrany výstupního optického vlákna před poškozením. Toto vlákno je má u specializovaných diod délku několik desítek centimetrů, avšak pro účely zapojení není celá délka zapotřebí. Přebývajícím vlákno je proto potřeba smotat a upevnit jej na desce, aby nebylo mechanickým namáháním (přivřením či skřípnutím) poškozeno. Jelikož na horní straně desky není na rozdíl od spodní strany pro tento svazek místo, je LD umístěna ze spodní strany DPS. Další rozložení komponentů na desce je následující. Zdrojová část (usměrňovací můstek, filtrační kondenzátory a stabilizátory) leží v oddělené části tak, aby v případě, že se na vstupu objeví ať už vysoko, nebo nízkofrekvenční rušení, nedošlo k jeho přenosu pomocí induktivních či kapacitních vazeb do dalších částí obvodu. Z toho důvodu nejsou obě tyto části spojeny ani stíněním. Místo něj jsou zde vylity měděné plochy rozvádějící proud mezi vstupní svorkovnicí, usměrňovačem a stabilizátory. V přední části desky se nachází několik konektorů: zaprvé

dvořadý konektor pro připojení displeje na panelové desce, poté BNC konektor sloužící pro vstup externích synchronizačních pulzů, dále řada konektorů přivádějících signál od tlačítek a pro signalizační LED na předním panelu, a nakonec USB konektor určený pro komunikaci desky s osobním počítačem. Konektor určený pro naprogramování není vyveden na přední panel, jelikož k programování dojde pouze při výrobě, a dále již nebude zapotřebí (v případě nutnosti nahrání nového programového vybavení mikrokontroléru, tak zvaného firmwaru, je tento konektor ponechán, bude však přístupný pouze po rozebrání krytů z boční strany DPS). Důležitým pravidlem při návrhu desky je umístění všech blokovacích kondenzátorů co nejbližší k integrovaným obvodům, ke kterým náleží. Obě vnější vrstvy jsou doplněny také rozlitou mědí, přes feritovou perličku propojena se zemí a slouží jako stínění.

Vzhledem ke komplikovanosti navržené DPS nebylo možné zajistit její výrobu v domácích či školních podmínkách. Realizace více jak dvouvrstvé desky vyžaduje laminování vnějších vrstev ve formě takzvaného prepregu (tenká vrstva skelného laminátu a měděnou fólií a bez vytvrzené pryskyřice). K tomu je nutné nejen odpovídající strojní vybavení a materiál, ale také mnohé zkušenosti, jež zaručí přesnost sesazení jednotlivých vrstev. Dále pro vícevrstvou desku je bezpodmínečně nutné vytvoření vodivých prokovení mezi jednotlivými vrstvami. Jejich výroba obnáší práci se specializovanými chemikáliemi, které nejsou dostupné pro fyzické osoby (toxicita, cena). Návrh desky je navíc z důvodů minimalizace proveden s rozlišením již od 0,2 mm šířky vodivé čáry respektive izolační mezery, a dokonce i minimální velikost prokovených otvorů je 0,2 mm (počet takto malých děr byl omezen na minimum, v několika případech by však jejich zvětšení znamenalo neúměrné zvětšení plochy DPS). Tak vysoká hustota spojů vyžaduje opravdu pečlivou výrobu. Z těchto důvodů byla zvolena možnost výroby u jedné ze specializovaných firem, jež se touto problematikou zabývají. V České republice existuje několik takovýchto firem, v tomto případě byl zvolen výrobce PragoBoard s.r.o. [30]. Technologie a parametry výroby DPS byly vybrány tak, jak uvádí tabulka 1.

**Tabulka 1:** Zadané parametry výroby hlavní DPS

Počet kusů	1
Počet vrstev	4
Základní materiál	FR4, tloušťka 1,2 mm, 35 $\mu\text{m}$ Cu
Prepreg (jedna strana)	2 x 65 $\mu\text{m}$ , 18 $\mu\text{m}$ Cu
Rozlišení spoj/mezera	$\geq 150 \mu\text{m}$
Vrtání	$\geq 0,2 \text{ mm}$
Nepájivá maska	zelená, oboustranně
Servisní potisk	bílý, oboustranně
Povrchová úprava pájecích ploch	ENIG
Formátování vnějšího obrysu	frézování, průměr frézy 2,4 mm
Elektrický test	ano

Výsledek výroby DPS bohužel ne zcela odpovídá předpokladům. Výroba desky byla zřejmě sloučena s dalšími ve službě POOL servis (z ekonomických důvodů výrobce PragoBoard slučuje jednotlivé DPS od různých zadavatelů vyráběné mimo větší série, obzvláště se to týká prototypových desek) [31]. Má DPS ovšem byla (zřejmě omylem) zařazena do série, u které nebyl pro konečnou povrchovou úpravu pájecích ploch zvolen požadovaný pozlacený chemicky nanosený nikl (ENIG), ale H.A.S.L. ENIG vyniká vysokou rovinností a malým namáháním při nanášecím procesu, zato použitý H.A.S.L. (nanášení bezolovnatého cínu ponorem do vany s jeho taveninou a odstraněním přebytku pájky proudem horkého vzduchu) nikoliv. Dodaná deska má tedy nižší rovinnost, což se později projevilo při osazování bezvývodových pouzder typu QFN a DFN, a při kontrole pod mikroskopem byly odhaleny i defekty v horní vrstvě nalaminovaného prepregu. Tyto nesrovnalosti nemají naštěstí ve

výsledku vliv na funkci zařízení, pouze u sériové výroby by mohly způsobit vznik nežádoucích zmetků.

## 4.2. Deska předního panelu

Deska předního panelu je, jak již bylo řečeno, pouze určená pro připojení alfanumerického LCD displeje, ovládacích tlačítek a indikačních LED tak, aby byly dobře přístupné při zabudování zapojení do přístrojové krabičky. Její zapojení a rozmístění součástek je znázorněno na obrázku v příloze G. Vzhledem k tomu, že je tato deska pouze jednostranná, a i hustota zástavby je výrazně menší, není nutné její výrobu zadávat.

Deska byla vyrobena pomocí nažehlovací technologie, kdy je motiv vygenerovaný z návrhového systému vytištěn na laserové tiskárně na speciální fólii [32] a následně je nažehlením nanesen na cuprexit. Tím vznikne na měděné vrstvě požadovaný vzor z toneru a z přenesené barvy z fólie, který následně slouží jako leptuvzdorný rezist při leptání v kyselé lázni (chlorid železitý). Vzhledem k jednoduchosti není u této desky ani zapotřebí vytvářet nepájitelnou masku či dokonce potisk.

## 5. Osazení a oživování zapojení

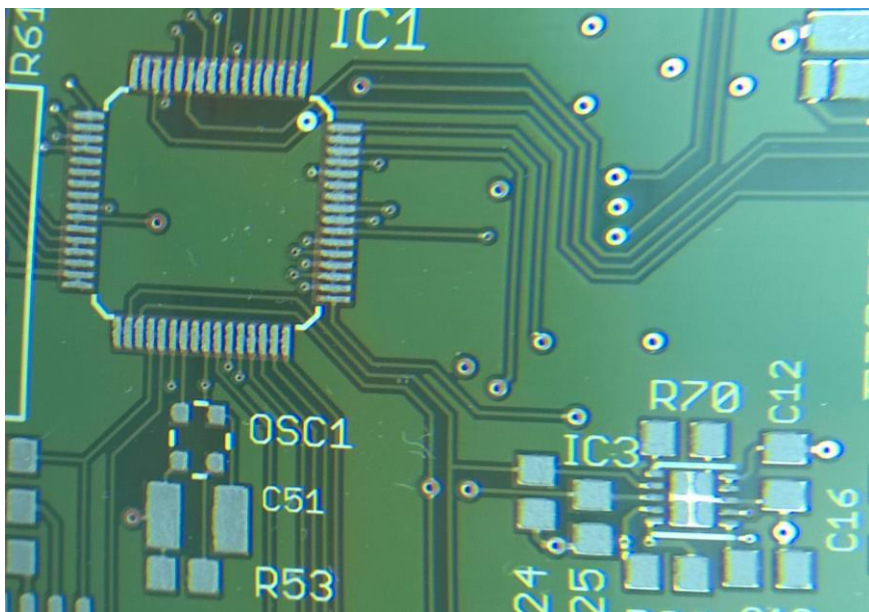
Vyrobené desky plošných spojů bylo nutné osadit zakoupenými součástkami. Deska plošných spojů předního panelu byla osazena zcela manuálně. Popis osazení hlavní DPS, která obsahuje 162 SMD komponentů a jen 18 vývodových součástek, je popsán níže.

### 5.1. Osazování hlavní řídicí desky

Součástky na hlavní desce jsou vybrány v převážně většině v SMD technologii. Důvody pro tuto volbu jsou v zásadě dva: jednak minimalizace rozměrů desky a zadruhé neexistence některých (převážně polovodičových integrovaných obvodů) ve vývodovém provedení. Bohužel tato volba přináší značné ztížení ručního osazování. Vzhledem k možnosti využít strojního osazení a zapájení SMD prvků v zaměstnání, bylo pro většinu těchto součástek použito této metody. Postup strojního osazování lze rozdělit do následujících kroků, postup bude popsán pouze pro osazení první strany DPS (jako první se osazuje ta strana, která obsahuje méně prvků, nebo prvky s výrazně menší hustotou zástavby).

Nejprve je nutné na desku nanést pájecí pastu. Toto může být provedeno několika způsoby, v tomto případě připadá v úvahu pouze tisk pasty skrze šablonu, či dispenze pasty osazovacím automatem. Druhá možnost je ovšem výrazně méně přesná, respektive pro dosažení stejné či vyšší přesnosti jako u tisku by vyžadovala neúměrně více času (nutné precizní naprogramování a navíc čas samotného dispensování, který je mnohem zdouhavější než u tisku). Z těchto důvodů byla preferována první varianta. Ruční šablonová tiskárna SAB-69 [33] umožňuje přesný tisk pájecích past díky trojosému systému přesného sesazení šablony a DPS. Šablonu do této „pastovačky“ lze opatřit dvojím způsobem. Je možné využití nerezové šablony o přesně definované tloušťce, jejíž výroba však není jednoduchá (je zapotřebí výkonného laseru schopného řezat kovy s velmi vysokou přesností), její obstarání by znamenalo náklady zhruba ve výši 1500 Kč (nutná poptávka ve specializované firmě). Druhou a zvolenou možností je použití polyesterové fólie. Cena této fólie je přibližně 50 Kč za formát A3, což je dostačující pro vytvoření šablony na obě strany DPS (konkrétní typ použité fólie nabyt firmou sdělen, cena je proto pouze orientační). Vytvoření otvorů do této fólie již nevyžaduje tolik výkonu jako u kovu, a bylo tak možné využít firemní laser VLS3.60 [34]. Podkladová data je opět možné vygenerovat z návrhového systému DPS. Laserem vypálenou

šablonu je nejprve nutné zbavit jemným sirkovým papírem (hrubost minimálně 800 a vyšší) otřepů po vypalování a napnout ji do tiskárny. Vzhledem k použitému materiálu dochází při přílišném napínání k deformaci šablony a apertury by poté neseděly na pájecí plošky na DPS – je nutné tuto šablonu napínat velice opatrně. Následuje přesné vycentrování DPS pod fólií za pomoci 3 šroubů (rovina XY) a případné seřízení výšky pomocí několika dalších šroubů (osa Z – fólie se musí dotýkat DPS). Na připravenou sestavu je nanášeno patřičné množství pasty a za pomoci silikonové stěrky je tato pasta protlačena skrze apertury na DPS. Díky tixotropním vlastnostem pasty dojde k jejímu protečení přes otvory pouze při zvýšeném tlaku a při následném zvednutí šablony již nedochází k roztékání „ztuhlé“ pasty do okolí (výsledek ukazuje fotografie na obrázku 14). Jako pájecí pasta byla použita olovnatá no-clean pasta od výrobce Qualitek DSP 818 [35].



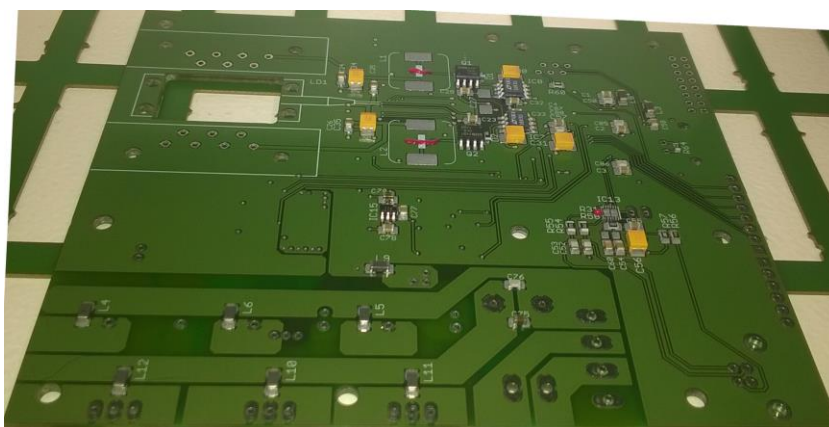
**Obrázek 14:** Fotografie výseku DPS s nanášenou pájecí pastou (deformace obrazu způsobena zobrazením přes lupu).

Dalším krokem při osazování je nanášení lepidla (je použito lepidlo TB 2217H [36]) pod pouzdra součástek, u kterých při přetavování nepůsobí dostatečně vysoké povrchové napětí mezi pájecí ploškou, pájkou a vývodem SMD. Toto lepidlo zajišťuje, aby při přetavení pasty na druhé straně DPS nedošlo k odpadání velkých součástek osazených v prvním průchodu. Nanášení tohoto lepidla pod vybrané prvky na spodní straně (u horní již není potřeba) je provedeno za pomoci dispenzeru strojní osazovačky. Osazovací zařízení BA3851V1 [37] od společnosti Autotronik umožňuje dispensování až dvou materiálů zároveň, v úvahu připadá pájecí pasta a zmiňované lepidlo. Před nanášením lepidla i následným osazováním součástek je nutné jednak nastavit upínání desky do osazovačky, a jednak je zapotřebí osazovací stroj řádně naprogramovat. Tento proces může u komplikovaných desek trvat až několik hodin, a je proto vhodné osazovat záraz větší série desek. Další podrobný postup programování a nastavení osazovačky není součástí této práce.

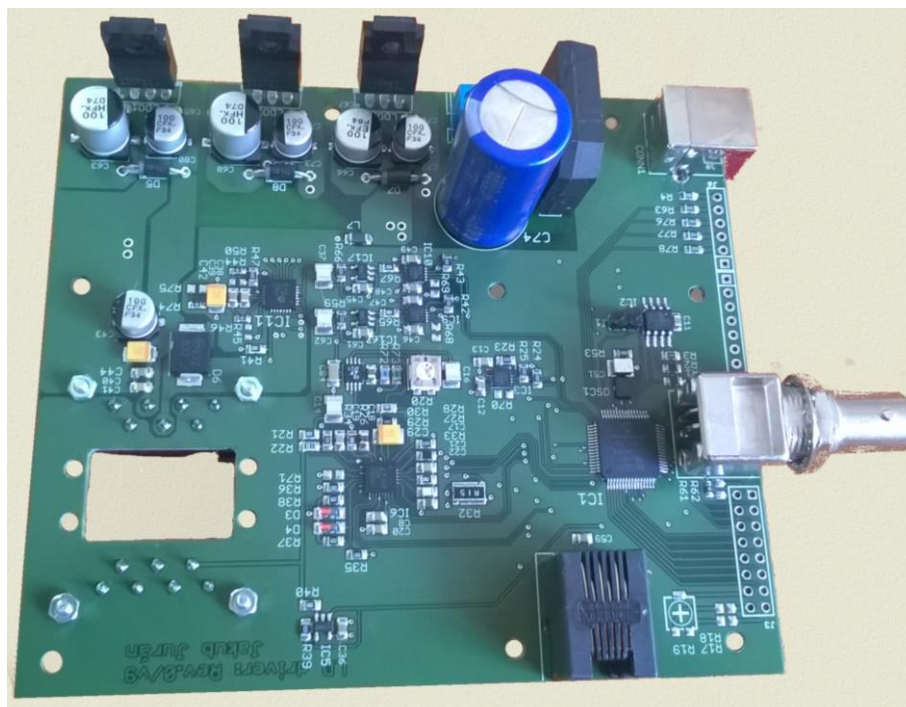
Po nanášení lepidla (v mém případě pouze pro 14 prvků), dochází ihned k osazení SMD prvků. Vzhledem ke komplikovanosti „učení“ nových typů pouzder do osazovačky bylo z osazování vynecháno několik prvků (elektrolytické kondenzátory, cívky, odporový trimr), jejichž ruční doosazení není problematické a u výroby pouze jednoho prototypu zabere výrazně méně času, než osazení strojní. Na obrázku 15 je ukázka strojně osazené spodní strany DPS bez indukčností L1 a L2 a integrovaného obvodu IC13, kteří byli doosazeni ručně.

Bezprostředně po osazení (a případném doosazení a kontrole správné polohy všech prvků) je deska umístěna do přetavovací pece. Firma disponuje průběžnou čtyřzónovou přetavovací pecí BS 3020 [38] od společnosti Autotronik. Tato pec umožňuje nastavení požadovaného pájecího profilu (jak teploty, tak rychlosti běžícího pásu). Nevýhodou této pece je hrozící riziko „poskočení“ pájené desky po dopravníku, čímž může dojít ke stržení již zapájených prvků ze spodní strany. Ověřenou metodou jak tomuto problému zabránit je podložení pájené DPS tak, aby neležela přímo na drátěném dopravníku.

Desku se zapájenými SMD součástkami je následně nutné ručně doosadit součástkami vývodovými. Kompletně osazenou desku je nutné zbavit tavidlových zbytků a případných kuliček pájky přetavených mimo vývody či pájecí plošky. Toto bylo provedeno za pomoci strojní myčky DPS. Další fotografie (obrázek 16) ukazuje osazenou DPS z vrchní strany.



**Obrázek 15:** Fotografie spodní DPS s naneseným lepidlem (červená barva) a osazenou většinou součástek.



**Obrázek 16:** Fotografie osazené DPS včetně vývodových součástek.

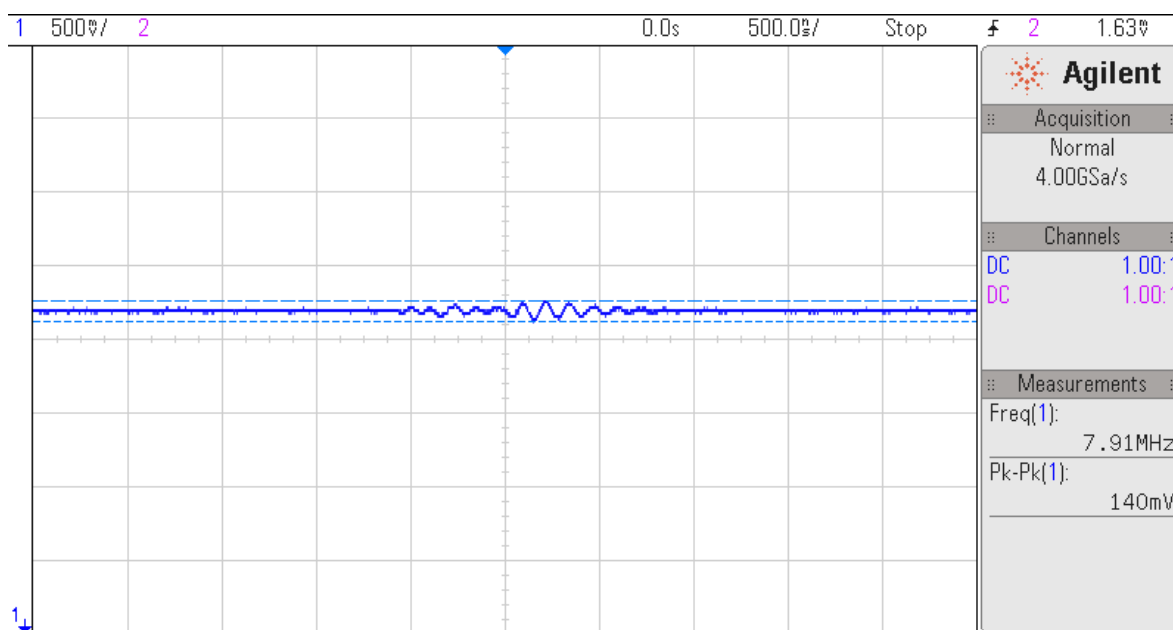
Strojní osazování SMD prvků bylo provedeno na zařízení a p prostorách firmy Moravské přístroje s.r.o. [39].

## 5.2. Oživení zapojení

Kompletně osazené zapojení (obě DPS spojené dohromady) bylo nutné připojit k napájení a vyzkoušet, zdali nedošlo při návrhu či osazování ke vzniku chyby, která by při plném napájení či zatížení mohla způsobit fatální poškození součástek či desky.

Na svorkovnici napájení bylo přivedeno nejprve stejnosměrné napájecí napětí z laboratorního zdroje, přičemž byl omezen jeho výstupní proud na hodnotu několika desítek miliampér. Velikost napájecího napětí byla postupně zvyšována od nulové hodnoty, přičemž byl sledován aktuální proudový odběr. Při napětí přibližně 4,5 V (úbytek stejnosměrného napětí na diodách Grätzova můstku a na stabilizátoru napětí) došlo ke spuštění mikrokontroléru a také displeje, což se projevilo mírným nárůstem proudu. Při dalším zvyšování napětí zdroje se začalo rozsvěcovat podsvětlení LCD displeje, a také začal prudčeji narůstat odebíraný proud. Oba tyto jevy byly navzájem spojeny, a to z důvodu nevhodně navrženého napěťového děliče pro nastavení napětí podsvětlení (původně byl uvažován displej bez podsvětlení a na jeho nevyužitý kontakt bylo přivedeno přes zkratovací propojku plná hodnota napětí 5voltové větve). Po napravení této chyby (nahrazení rezistoru R61 o hodnotě 0  $\Omega$  za hodnotu 10  $\Omega$ , a doplnění rezistoru R62 o hodnotě 220  $\Omega$ ) klesla hodnota proudu na očekávaných 120 mA (spotřeba displeje 90 mA zabírá většinu, zbytek odpovídá výkonovým ztrátám napěťových děličů, a vlastní spotřebě všech integrovaných obvodů). Tato hodnota se již zásadně nezvyšovala, a to ani při navýšení napájení až na hodnotu 12 V. Tímto bylo ověřeno, že při následném testování nedojde k poškození obvodu, a to ani při používání neřízeného zdroje.

Dalším testem bylo přivedení střídavého napájení na vstupní svorky. Tato zkouška měla prokázat, zda usměrňovač, filtrační kondenzátory a stabilizátory dokáží účinně filtrovat střídavé složky. Toto napětí bylo přivedeno opět z laboratorního programovatelného zdroje střídavého napětí. Jedná se o spínaný zdroj, kde je vstupní napětí síť usměrněno, a následně rozsekáno zpět na střídavý průběh. Tato přeměna však znamená zanesení i mnohonásobných vyšších harmonických složek do výstupního napětí. Tento fakt pouze zvyšuje náročnost testu a je-li jeho výsledek uspokojující, znamená to, že při napájení běžným transformátorem (obsah vyšších harmonických frekvencí v síti je velmi nízký) bude funkce taktéž správná.



Obrázek 17: Záznam zákmitu na 5 V napájecí větvi zachycený na osciloskopu (invertované barvy).

Výsledkem testu bylo zjištění, že běžná amplituda rozkmitu ve všech větvích je do hodnoty 35 mV. Pouze u 5 V větve určené k napájení Peltierova článku a také podsvětlení LCD se jednou za čas objevil zákmit o špičkové 140 mV (viz obrázek 17). Tento jev je způsoben nejspíše neuregulováním smyčky uvnitř LDO při již částečně fungující PWM regulaci pro termočlánek. Amplituda i frekvence opakování zákmitů (objevovaly se vždy s rozmezím několika sekund) však není velká a neohroží fungování obvodu. Jejich odstranění by bylo možné zařazením většího kondenzátoru na výstup LDO. U ostatních napětí nebyly podstatné projevy naměřeny.

### 5.3. Dodatečné úpravy

Během kompletace zapojení došlo ke zjištění, že výřez v předním panelu pro průchod BNC konektoru není dostatečný (technologická chyba), a že je nutné jej rozšířit. K objevení nedostatku došlo až po částečném připájení panelu (čtyři krajní piny spojovacích konektorů) a bylo nutné je odletovat. Při této opravě bohužel došlo k poškození prokovic u dvojice ze zaletovaných vývodů, které musely být opraveny (drátová propojka a cínový můstek).

Druhou, později zjištěnou závadou (odhalena byla až při programování mikrokontroléru), bylo špatně navržené zapojení sběrnice SPI sloužící k nastavení výstupního napětí na DA převodnicích. Oprava spočívala v přerušení jednoho z vodičů a jeho propojení na jiný výstup mikrokontroléru a doplnění dalšího vodiče. Díky navrženým pull-down rezistorům na jinak nepřipojených SDO pinech DA převodníků bylo možné sem snadno přivést odpovídající signál pomocí drátové propojky (rezistory zde osazeny být nemají).

Obě z uvedených úprav jsou již zahrnuty do poslední verze návrhu uvedené v elektronické příloze této práce.

## 6. Programové vybavení

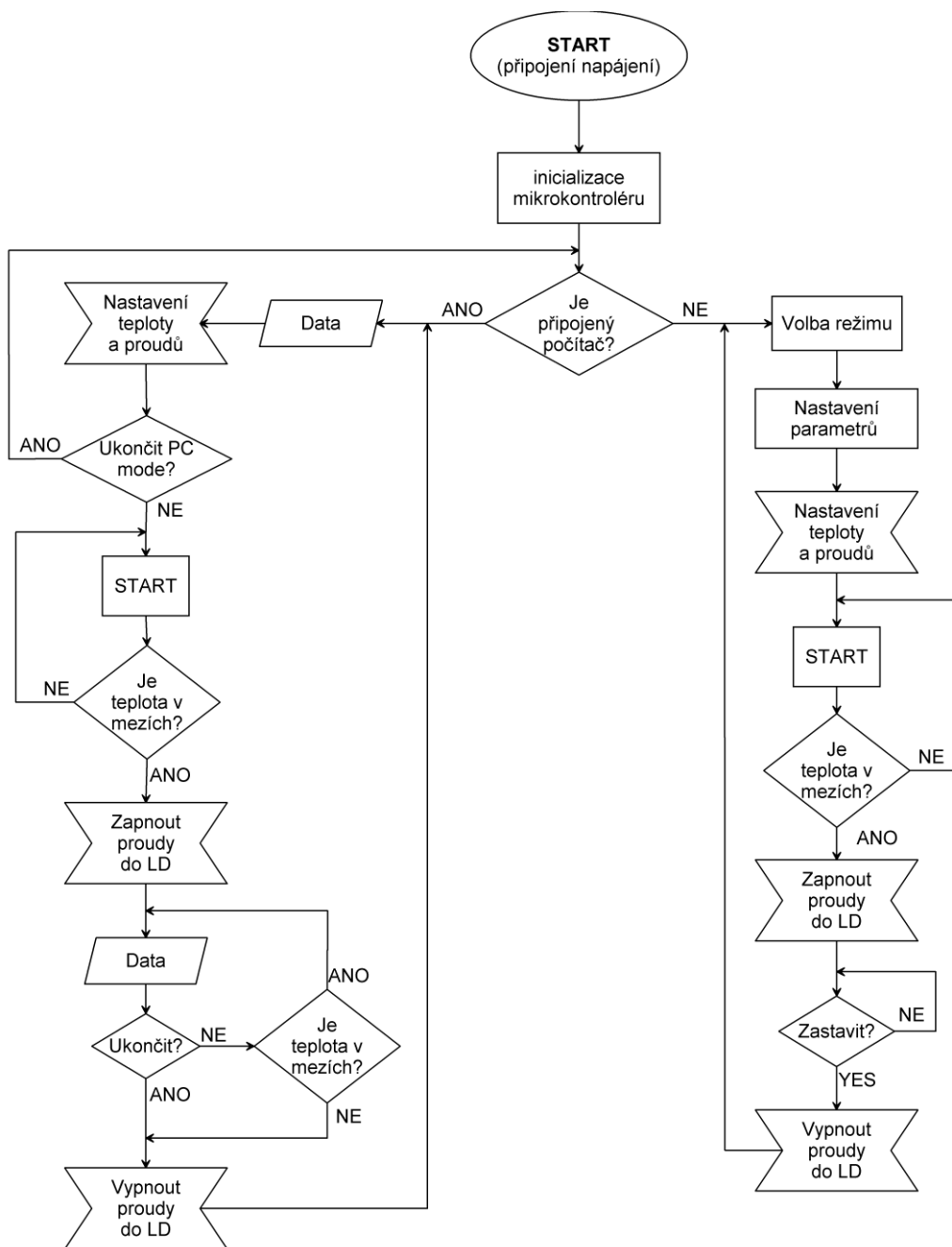
Pro správnou funkci navrhovaného zařízení je nutné naprogramovat mikrokontrolér, který zajišťuje řízení laserové diody pomocí výše zmiňovaných periférií. Dále byla vytvořena aplikace pro osobní počítače se systémy Microsoft Windows pro komunikaci s celým zařízením. V následujících kapitolách budou oba programy rámcově popsány.

### 6.1. Programová výbava mikrokontroléru

Ovládací program mikrokontroléru je koncipován tak, jak uvádí vývojový diagram na obrázku 18. Jako celek se však skládá z několika menších, nezávislých bloků, které budou dále popsány. Celý program je vytvořený v jazyce C upraveném pro překladač XC16 [40] společnosti Microchip.

#### **Nastavení taktování mikrokontroléru:**

Kvůli potřebě vysokého rozlišení optických pulzů je nutná vysoká taktovací frekvence procesoru (generování impulzů je přímo závislé na taktovací frekvenci). Vzhledem k tomu, že frekvence vstupního oscilátoru je omezená (maximálně je dovoleno 60 MHz, zvolený oscilátor dodává pouze 10 MHz), je nutné využít interního fázového závěsu (anglicky phase lock loop, odtud zkratka „PLL“), díky kterému je možné zvýšit frekvenci až na 140 MHz, tedy 70 milionů provedených instrukcí za vteřinu. S rostoucí frekvencí ovšem roste spotřeba obvodu, a také náchylnost na rušení a vznik přeslechů. Ve výsledku byla zvolena taktovací frekvence 100 MHz, což bohatě vystačuje pro generování impulzů o požadovaných parametrech (odpovídá rozlišení 20 ns nastavovacího kroku impulzů).



**Obrázek 18:** Zjednodušený vývojový diagram softwaru mikrokontroléru.

Nastavení taktování pomocí fázového závěsu je provedeno pomocí tří děliček, jejichž nastavení lze vypočítat podle aplikační poznámky [41] následovně:

$$F_{\text{PLLI}} = \frac{F_{\text{IN}}}{\text{PLLPRE} + 2}, F_{\text{PLLI}} \in (0,8; 8,0) \text{ MHz}, \quad (22)$$

kde  $F_{\text{IN}}$  je frekvence vstupního oscilátoru,  $F_{\text{PLLI}}$  je vstupní frekvence fázového závěsu, která musí odpovídat uvedenému rozsahu, a  $\text{PLLPRE}$  je nastavovací registr vstupní děličky s rozsahem 0 až 32.

$$F_{\text{VCO}} = F_{\text{PLLI}} \cdot (\text{PLLDIV} + 2), F_{\text{VCO}} \in (120; 340) \text{ MHz}, \quad (23)$$

kde  $F_{\text{VCO}}$  je frekvence napětím řízeného oscilátoru, která musí odpovídat uvedenému rozsahu, a  $\text{PLLDIV}$  je nastavovací registr zpětnovazební děličky fázového závěsu s rozsahem 0 až 256.

$$F_{OSC} = F_{PLLO} = \frac{F_{VCO}}{2 \cdot (PLLPOST+1)}, F_{PLLO} \in \langle 15; 140 \rangle \text{ MHz}, \quad (24)$$

kde  $F_{PLLO}$  je výstupní frekvence fázového závěsu, která odpovídá taktovací frekvenci  $F_{OSC}$  a která musí odpovídat uvedenému rozsahu, a  $PLLPOST$  je nastavovací registr výstupní děličky s rozsahem 0 až 4.

Dosažením do těchto rovnic vyjdou hodnoty děliček:  $PLLPRE = 3$  (pro  $F_{PLLI} = 2$  MHz),  $PLLDIV = 98$  (pro  $F_{VCO} = 200$  MHz) a  $PLLPOST = 0$  (pro  $F_{PLLO} = 100$  MHz).

### **Modul časovače:**

Měření teploty LD a aktualizace informací na displeji nejsou prováděny neustále, ale pouze několikrát za vteřinu (častěji to kvůli tepelné kapacitě zařízení a schopnosti obsluhy sledovat informace na LCD nemá smysl). Pro nastavení intervalu slouží interní časovač, který vygeneruje přerušení a vykonají se odpovídající operace. Z nabídky procesoru je využit pouze časovač (timer) 1, a jeho nastavení je provedeno podle aplikační poznámky [42]. Nastavuje se především dělička vstupní frekvence  $TCKPS = 3$ , což odpovídá frekvenci časovače  $\frac{F_{OSC}}{2 \cdot 256}$ . Druhé nastavení je maximální hodnota čítače  $PRI$ , do které časovač čítá a při přetečení vygeneruje přerušení. Tento parametr je nastaven na hodnotu 48828 (z rozsahu 0 až 65535), což odpovídá intervalu mezi přerušeními přibližně 0,25 s.

### **Modul zobrazování na LCD:**

LCD displej slouží v zařízení jako hlavní zobrazovací nástroj pro vypisování aktuálních hodnot a stavů celého zařízení. Pro tyto účely byl vybrán displej s vlastním řadičem a s paralelním vstupem dat FDCC1602L-FLYYBW-91LE od čínského výrobce Fordata [43]. Pro správnou funkci displeje je nejprve nutná jeho inicializace. Ta se provádí specifickou sekvencí příkazů přivedených na jeho datové a ovládací piny, jak je uvedeno v katalogovém listu. Teprve po této inicializaci je možné začít posílat data, které se mají zobrazit. Použitý displej umožňuje zápis až 40 znaků na jeden řádek, zobrazuje se však pouze prvních 16 z nich. Pro jednoduchost je program naprogramován tak, že umožňuje zápis všech 40 znaků, a to z toho důvodu, že v displeji je nastavena funkce automatického posouvání paměťového registru, a není tedy potřeba řešit adresování jednotlivých znaků (vypíše se celý řádek a paměť se posouvá hned na pozici pro zápis na odpovídající dalšímu řádku).

### **Analogově digitální převodník:**

Řídící mikrokontrolér umožňuje přesný převod z analogových napětíových úrovní na digitální číslo. Této funkce bude využito pro kontrolu a sledování teploty laserového čipu a také pro kontrolu proudu protékajícího termoelektrickým článkem. Obě tyto funkce budou využívat jediného AD převodníku, a to pomocí výběru požadovaného kanálu před začátkem převodu. Přestože mikrokontrolér umožňuje řadu pokročilých funkcí, pro účely obou uvedených měření vystačí základní funkce s výstupem ve formě bezznaménkového integeru (unsigned int, ). Vzorkování AD převodu bude prováděno manuálně a převod na digitální číslo bude spouštěn automaticky. Důležitým parametrem je rychlost AD převodníku, která se nastavuje bitem  $ADCS$  v registru  $ADxCON3$  („x“ odpovídá zvolenému kanálu, v tomto případě 1) [44]. Nastavená doba (v katalogovém listu označená jako  $T_{AD}$ ) je 1  $\mu$ s, což několikanásobně převyšuje minimální doporučenou hodnotu 117,6 ns [26].

### **Modul komunikace po sběrnici SPI:**

Nastavení požadovaných proudů laserovou diodou a také nastavení teploty se provádí pomocí digitálně analogových převodníků, jejichž výstupní hodnota je závislá na digitálním vstupu. Komunikace mezi mikrokontrolérem a těmito převodníky probíhá po třívodičové

sběrnici SPI rozšířené o výběrový (enable) vodič sloužící pro určení obvodu, se kterým bude komunikace probíhat. Sběrnice SPI patří k jedné ze standardizovaných sběrnic (stejně jako dále rozebírané sběrnice I<sup>2</sup>C a UART) a vybraný mikrokontrolér obsahuje specializovaný modul vyhrazený pro tuto komunikaci. Po nastavení potřebných parametrů, viz aplikační poznámka [45] (mezi ně mimo jiné patří například volba komunikační rychlosti určená dvojicí děliček  $SPRE = 5$  a  $PPRE = 1$  v případě volby frekvence  $F_{SCK} = 1$  MHz) stačí nahrát posílaná data do specializovaného registru a vyčkat na odeslání. To je indikováno přijetím odpovědi do stejného registru. Následovat musí přečtení těchto dat a teprve poté mohou být posílána data další. Před zahájením posílání dat musí být vybrán požadovaný obvod přivedením logické 0 na jeho povolovací vstup a po ukončení komunikace je tento vstup navrácen do logické 1. DA převodníky vyžadují délku přijatých dat minimálně o 24 bitech (16 bitů zabírají data pro nastavení výstupu, 4 bity slouží jako příkazové a zbylé 4 jsou pouze k oddělení těchto dvou částí) [18]. Mikrokontrolér však umožňuje posílat maximálně 16 bitů v kuse, proto je nutné posílat dvě slova za sebou, přičemž zbylých 8 bitů DA převodník zahodí.

### **Modul komunikace po sběrnici I<sup>2</sup>C:**

Další z integrovaných komunikačních modulů je I<sup>2</sup>C [46]. Tato sběrnice slouží v tomto případě ke komunikaci s pamětí EEPROM. I<sup>2</sup>C je dvou vodičová sběrnice a pro komunikaci mezi obvody nepotřebuje dalších řídicích vodičů (na rozdíl od SPI) – výběr zařízení je zajištěn programově. Díky tomu je komunikační protokol mírně složitější. Navázání spojení začíná vygenerováním start bitu, tedy přechodem portu SDA (serial data) do logické 0. Okamžitě poté začíná obvod nastavený jako „master“ (nadržovaný obvod) generovat hodinový signál na vodiči SCK (serial clock) a datovým vodičem jsou přenášeny data o odpovídající délce (protokol umožňuje její nastavení). Při následujícím taktu po odeslání posledního znaku očekává obvod, jenž řídí komunikaci přijetí potvrzovacího znaku – takzvaný acknowledgement (zda se jedná o logickou jedničku či 0, záleží na charakteru odesílané zprávy, všechny podrobnosti o komunikaci jsou popsány v katalogových listech mikrokontroléru [26] a paměti EEPROM [27]). V prvním odesílaném slově je standardně obsažena adresa podřízeného zařízení. Tímto je zahájena komunikace a může následovat přenos dalších dat. Modul I<sup>2</sup>C mikrokontroléru zajišťuje většinu komunikace, je však nutné nastavit jeho parametry, kterými jsou rychlost sběrnice, délka posílaných dat, nastavení ověřování a další.

### **Sériová komunikace UART:**

Poslední z využívaných komunikačních sběrnic je UART neboli asynchronní sériová sběrnice. Jedná se opět o dvou vodičovou komunikaci, která však nemá vedený žádný hodinový signál (na rozdíl od SPI). Nevýhodou tedy je, že obě komunikující zařízení musí mít vlastní generátor hodinového taktu. Nastavení parametrů zařízení je obdobné předchozím sběrnicím. Taktovací signál se zde však přímo neobjevuje, nastavuje se nepřímou pomocí rychlosti toku dat, tzv. baud rate. Podrobné informace se nacházejí v aplikační příručce [47]. V mém zapojení je UART využit ke komunikaci mezi mikrokontrolérem a osobním počítačem. Moderní počítače již obvykle neobsahují sběrnici typu UART přímo vyvedenou pro připojení periférií – tuto roli nahradilo běžnější USB. Proto je nutné převedení úrovní mezi těmito standardy a k tomu je využit obvod FT234XD. Po jeho připojení k PC (a nainstalování ovladačů) dojde k vytvoření virtuálního sériového portu typu UART a obě zařízení spolu mohou začít komunikovat.

### **Modul generování obdélníkového signálu PWM:**

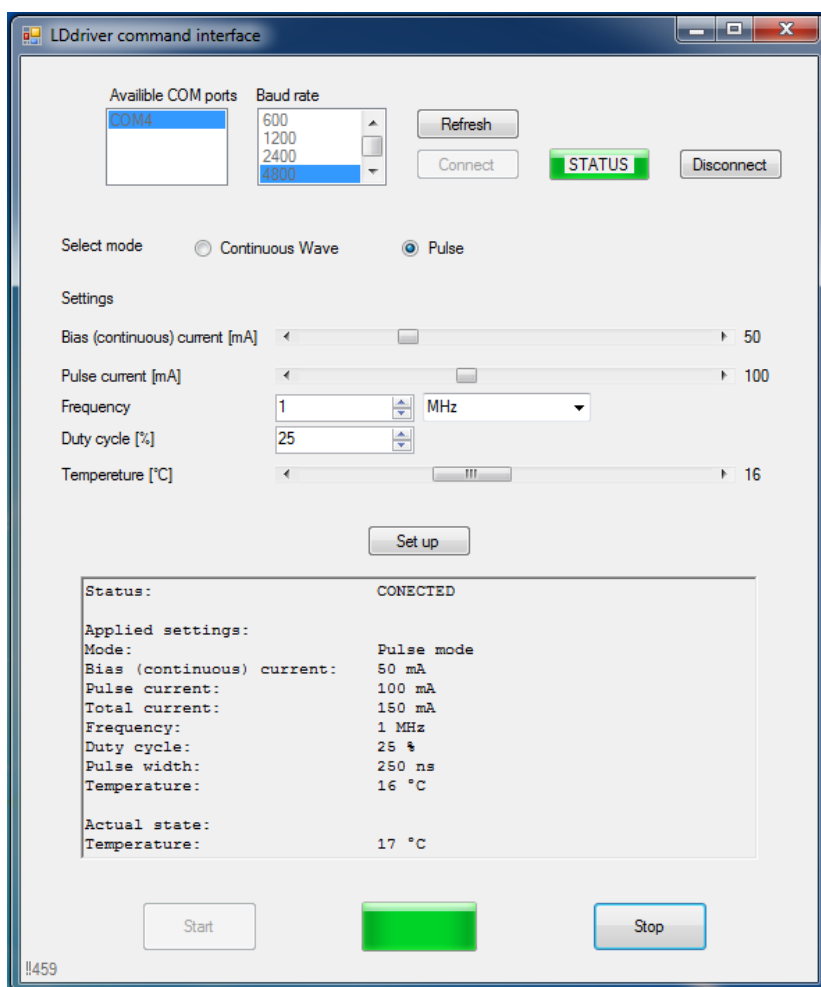
Důležitou komponentou programu je funkce pulzně šířkové modulace. Výhoda použitého mikrokontroléru je právě integrovaný modul rychlého PWM generátoru [48]. Jeho

primární funkce je ovládání tranzistorů ve spínaném zdroji (například řízení motorů). Pro funkci zařízení však stačí jediný kanál na rozdíl od komplikovaného řízení spínaného zdroje (obvod disponuje až 6 kanály). Modul také obsahuje celou řadu ochranných prvků, jako například možnost vypnutí PWM generátoru z externího přerušení, či z přerušení generovaného AD převodníkem (je předpokládáno jeho použití pro hlídání maximálního proudu zátěží) a podobně. Nevýhodou takto univerzálního modulu je jeho velice komplexní systém nastavení. Celý modul obsahuje 42 až šestnáctibitových registrů, ze kterých je pro potřeby tohoto zapojení využit jen zlomek. Je však vhodné nastavení i ostatních, a to z důvodu nebezpečí vzniku chybového stavu nebo nežádoucího nastavení některou z předdefinovaných hodnot. Nastavení frekvence a střídy generovaného signálu je určeno uživatelem, stejně tak možnost spouštění signálu z externího zdroje.

Ověření funkčnosti všech výše uvedených bloků bylo provedeno postupným měřením (osciloskop, datalogger, multimetr) a případně jejich odladěním volbou jiných taktovacích frekvencí, změna některých parametrů a podobně.

## 6.2. Uživatelské rozhraní ovládání přes osobní počítač

Jednoduchý ovládací program vytvořený pro operační systém Microsoft Windows 7 [49] a vyšší umožňuje provést základní nastavení zařízení včetně jeho spuštění, a také kontrolu aktuálního stavu (teplota, nastavené proudy atd.). Podrobnější popis aplikace zobrazené na obrázku 19 však není součástí této práce.



Obrázek 19: Ukázka uživatelského ovládacího programu pro osobní počítače.

## Závěr

Během řešení této bakalářské práce byla probrána problematika řízení laserových diod, a to nejen z teoretického hlediska, ale bylo i navrženo funkční zapojení možného řídicího obvodu. Jeho popis byl rozdělen do několika dílčích částí, které byly detailně rozebrány v kapitole 3, v následující kapitolách 4 a 5 byla uvedena problematika jeho výroby. V rámci bakalářské práce byly nejprve napočítány teoretické hodnoty všech součástí ovlivňujících parametry zapojení. Následně byly navrženy hodnoty všech zbylých součástí (součástky sloužící jako ochranné prvky, součástky s indikační funkcí a další), a to podle požadavků jednotlivých obvodů nebo podle zkušeností s podobnými, dříve řešenými, zapojeními. Celé zapojení bylo navrženo podle specifikovaných požadavků. Ve většině případů jsou ale obvody předimenzovány a by bylo možné jednoduchým rozšířením jejich parametry ještě vylepšit. Některými z možných úprav jsou zvýšení výstupního proudu až na hodnotu 9 A při pulzním režimu (oproti stávajícím 300 mA), doplnění obvodu o výstupy pro další dvě diody či další zvýšení maximální dosahované frekvence generovaných pulzů. Tyto úpravy by ale mohly způsobit vznik hazardních stavů, a protože jsou nad rámec požadavků, nebyly v návrhu uplatněny.

Po sestavení zapojení následovalo jeho oživení a naprogramování, přičemž byla ověřena většina z klíčových vlastností zapojení. Při psaní této práce nebyla k dispozici žádná z uvažovaných laserových či superluminiscenčních diod a všechna měření tak probíhala za pomoci součástek v oddělených pouzdrech (termistor, Peltierův článek). Tento režim práce sice neodpovídá přesně očekávanému režimu, ověření funkcí je v něm však možné a přechod do běžného provozního stavu znamená jen úpravu obvodových konstant v obslužném softwaru.

V poslední části práce je rozebrána problematika řídicího programového vybavení mikrokontroléru a je zde i nastíněna možnost ovládání celého obvodu pomocí uživatelské aplikace běžící na osobním počítači.

Ve srovnání s komerčními laboratorními či říditelnými napájecími zdroji laserových diod kombinuje výše popsané zapojení několik výhod. Ty základní z nich jsou možnost řízení proudu diody v kombinaci s regulací její teploty v jednom zapojení (některé z komerčních zařízení se specializují pouze na jednu z problematik, což vyžaduje zapojení více nákladných komponent), možnost pulzního režimu o vysoké frekvenci s možností regulace střídý (dosahovaná frekvence je srovnatelná se zařízeními vyšších kategorií, některá levná zařízení umožňují pulzní režim pouze do frekvencí v řádech kHz, jiná umožňují pouze kontinuální mód), možnost řízení z PC či možnost přímého připojení laserové diody k zařízení bez potřeby propojovacích vodičů (menší náchylnost na rušení).

Na závěry této práce bude navázáno v dalším výzkumu, při kterém bude ověřena problematika řízení přímo specializovaných diod. Následovat bude také kompletace finálního zařízení do konstrukčního boxu, včetně doplnění o síťový transformátor, filtrační prvky a další komponenty umožňující kvalitní obsluhu a provoz finálního produktu.

## Bibliografie

- [1] IC-HAUS. *3 A Laser Switch: [Datasheet]*. Revize B2. Bodenheim, Německo: iC-Haus GmbH, 2014, s. 20. Dostupné také z: [http://www.ichaus.de/upload/pdf/HG\\_datasheet\\_B2en.pdf](http://www.ichaus.de/upload/pdf/HG_datasheet_B2en.pdf)
- [2] LINEAR TECHNOLOGY. *High Efficiency Thermoelectric Cooler Controller: [Datasheet]*. Milpitas, California, USA: Linear Technology Corporation, 2001, s. 28. Dostupné také z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1923f.pdf>
- [3] ŠULC, Jan, Aleš KŘUPÁK. *Lasery a jejich aplikace. AK Laser: Profesionální gravírování, popisování a gravírování progresivní laserovou technologií* [online]. Praha, 2002 [cit. 2014-12-16]. Dostupné také z: <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>
- [4] VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ a Petr GAVRILOV. *Úvod do laserové techniky*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1998, s. 209. Dostupné také z: [http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/ulat\\_1\\_8.pdf](http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/ulat_1_8.pdf). Skriptum.
- [5] LUKÁŠ, Michal. *Elektrorevue: časopis pro elektrotechniku* [online]. Brno: International Society for Science and Engineering, o.s., 2001 [cit. 2014-12-16]. ISSN 1213-1539. Dostupné také z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>
- [6] LUKÁŠ, Michal. *ELEKTROREVUE: ČASOPIS PRO ELEKTROTECHNIKU. Laserové diody 3: Parametry laserových diod a jejich měření* [online]. Brno: International Society for Science and Engineering, o.s., 2002 [cit. 2014-12-16]. ISSN 1213-1539. Dostupné také z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02023/index.html>
- [7] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika, součástky a obvody, principy a příklady*. 2., rozš. vyd. Praha: Grada, 2001, 188 s. ISBN 80-716-9884-9.
- [8] SHIDLOVSKI, Vladimir. *Superluminescent Diodes: Short overview of device operation principles and performance parameters*. In: *Superlum* [online]. Carrigtwohill, Ireland, 2004 [cit. 2014-12-16]. Dostupné také z: [http://www.superlumdiodes.com/pdf/sld\\_overview.pdf](http://www.superlumdiodes.com/pdf/sld_overview.pdf)
- [9] PHOTONICS SPECTRA. *Photonics Packaging: Optical Communication Components* [online]. Německo: Laurin Publishing Company, 2009 [cit. 2014-12-16]. Dostupné také z: <http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25514>
- [10] LINEAR TECHNOLOGY. *Ideal Diode Bridge Controller: [Datasheet]*. Revize B. Milpitas, California, USA: Linear Technology Corporation, 2013, s. 14. Dostupné také z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/4320fb.pdf>
- [11] VISHAY GENERAL SEMICONDUCTOR. *Single-Phase Single In-Line Bridge Rectifiers: [Datasheet]*. Revize 2013-04-26. Malvern, Pennsylvania, USA: Vishay Intertechnology, Inc., 2013, s. 4. Dostupné také z: <http://www.vishay.com/docs/89385/gsib620n.pdf>

- [12] ROHM SEMICONDUCTOR. *2A/1A Fixed Output LDO Regulators, 2A/1A Fixed Output LDO Regulators With Shutdown Swicth: [Datasheet]*. Revize 003. Kyoto, Japonsko: ROHM Co., Ltd., 2013, s. 20. Dostupné také z: [http://rohmfs.rohm.com/en/products/databook/datasheet/ic/power/linear\\_regulator/baxx dd0-e.pdf](http://rohmfs.rohm.com/en/products/databook/datasheet/ic/power/linear_regulator/baxx dd0-e.pdf)
- [13] Peltierův článek. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2014-12-16]. Dostupné také z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Peltierův\\_článek](http://cs.wikipedia.org/wiki/Peltierův_článek)
- [14] LINEAR TECHNOLOGY. *DC388C - LTC1923EGN: TEC Temperature Controller, 2.7-6.0 Vin* [online]. Revize 1. Milpitas, California, USA: Linear Technology Corporation, 2013 [cit. 2014-12-16]. Dostupné také z: <http://www.linear.com/solutions/4535>
- [15] LINEAR TECHNOLOGY. *Precision, Rail-to-Rail, Zero-Drift, Resistor-Programmable Instrumentation Amplifier: [Datasheet]*. Revize C. Milpitas, California, USA: Linear Technology Corporation, 2010, s. 18. Dostupné také z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/2053syncfc.pdf>
- [16] LUMICS GMBH. *915nm Laser Module, Seed Laser: [Datasheet]*. Revize 2014-05-26. Berlin, Německo: Lumics GmbH, 2014, s. 2. Dostupné také z: [http://www.lumics.com/fileadmin/user\\_upload/Datasheets\\_Lumics\\_Products/Singlemode/14pin\\_BTf/LU0915M300.pdf](http://www.lumics.com/fileadmin/user_upload/Datasheets_Lumics_Products/Singlemode/14pin_BTf/LU0915M300.pdf)
- [17] MAXIM INTEGRATED. *Design Trade-Offs for Single-Supply Op Amps: [Aplikační poznámka]*. Revize 2000-04-03. San Jose, California, USA: Maxim Integrated Products, Inc., 2000. Dostupné také z: <http://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/656>
- [18] LINEAR TECHNOLOGY. *16-/14-/12-Bit Rail-to-Rail DACs in 10-Lead DFN: [Datasheet]*. Revize B. Milpitas, California, USA: Linear Technology Corporation, 2004, s. 16. Dostupné také z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/2601fb.pdf>
- [19] LINEAR TECHNOLOGY. *High Speed Single/Dual N-Channel MOSFET Drivers: [Datasheet]*. Revize A. Milpitas, California, USA: Linear Technology Corporation, 1999, s. 20. Dostupné také z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1693fa.pdf>
- [20] LINEAR TECHNOLOGY. *Single/Dual Micropower Zero-Drift Operational Amplifiers: [Datasheet]*. Revize C. Milpitas, California, USA: Linear Technology Corporation, 2004, s. 16. Dostupné také z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/20545fc.pdf>
- [21] INTERNATIONAL RECTIFIER. *HEXFET Power MOSFET: [Datasheet]*. Revize 2004-02-25. El Segundo, California, USA: International Rectifier world headquarters, 2004, s. 10. Dostupné také z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf7389.pdf>
- [22] Steinhart–Hart equation. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2014-12-16]. Dostupné také z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Steinhart–Hart\\_equation](http://en.wikipedia.org/wiki/Steinhart–Hart_equation)

- [23] MICREL. *3.3V, 2.7Gbps SDH/SONET Laser Driver with Automatic Power Control: [Datasheet]*. Revize B. San Jose, California, USA: Micrel, Incorporated, 2005, s. 7. Dostupné také z: [http://www.micrel.com/\\_PDF/HBW/sy889521.pdf](http://www.micrel.com/_PDF/HBW/sy889521.pdf)
- [24] ANALOG DEVICES, INC. *12-Bit High Output Current Source: [Datasheet]*. Revize A. Norwood, Massachusetts, USA: One Technology Way, 2009, s. 15. Dostupné také z: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADN8810.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADN8810.pdf)
- [25] ANALOG DEVICES, INC. *Micropower, High Accuracy Voltage References: [Datasheet]*. Revize B. Norwood, Massachusetts, USA: One Technology Way, 2010, s. 24. Dostupné také z: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADN8810.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADN8810.pdf)
- [26] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *DsPIC33EPXXXGP50X, dsPIC33EPXXXMC20X/50X and PIC24EPXXXGP/MC20X: 16-Bit Microcontrollers and Digital Signal Controllers with High-Speed PWM, Op Amps and Advanced Analog* [online]. Revize H. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology Incorporated, 2013, s. 530 [cit. 2014-12-16]. ISBN 9781620773949. Dostupné také z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70000657H.pdf>
- [27] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *24AA64/24LC64/24FC64: 64K I2C™ Serial EEPROM* [online]. Revize T. Chandler, Arizona, USA: Microchip Technology Incorporated, 2012, s. 44 [cit. 2014-12-16]. ISBN 9781620767641. Dostupné také z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21189T.pdf>
- [28] SILICON LABORATORIES INC. *32 KHZ–100 MHZ CMEMS® OSCILLATOR: [Datasheet]*. Revize 0.72. Austin, Texas, USA: Silicon Laboratories Inc., 2013, s. 22. Dostupné také z: <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/Si501-2-3.pdf>
- [29] FTDI CHIP. *USB I2C SLAVE IC: [Datasheet]*. Verze 1.3. Glasgow, Velká Británie: Future Technology Devices International Ltd., 2013, s. 42. Dostupné také z: [http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT200XD.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT200XD.pdf)
- [30] PRAGOBOARD S.R.O. *PragoBoard s.r.o.: O firmě* [online]. Praha, © 2012 [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z: [http://www.pragoboard.cz/o\\_firme](http://www.pragoboard.cz/o_firme)
- [31] PRAGOBOARD S.R.O. *PragoBoard s.r.o.: POOL servis - princip výroby* [online]. Praha, © 2012 [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z: [http://www.pragoboard.cz/pool\\_servis](http://www.pragoboard.cz/pool_servis)
- [32] CADWARE S.R.O. *CADware s.r.o.: Produkty → Modrá fólie* [online]. Liberec, © 2006 [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z: <http://www.cadware.cz/index.php?page=24&lang=cz>
- [33] P2J TECHNOLOGY, S.R.O. *Pájecí technika - vybavení nejen pro elektrotechnický průmysl: SMT sitotisk SAB 69*. *Www.pajeci-technika.cz* [online]. Dalešice, 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z: <http://www.pajeci-technika.cz/www-pajeci-technika-cz/eshop/18-1-SMT-sitotisky/0/5/306-SMT-sitotisk-SAB-69>

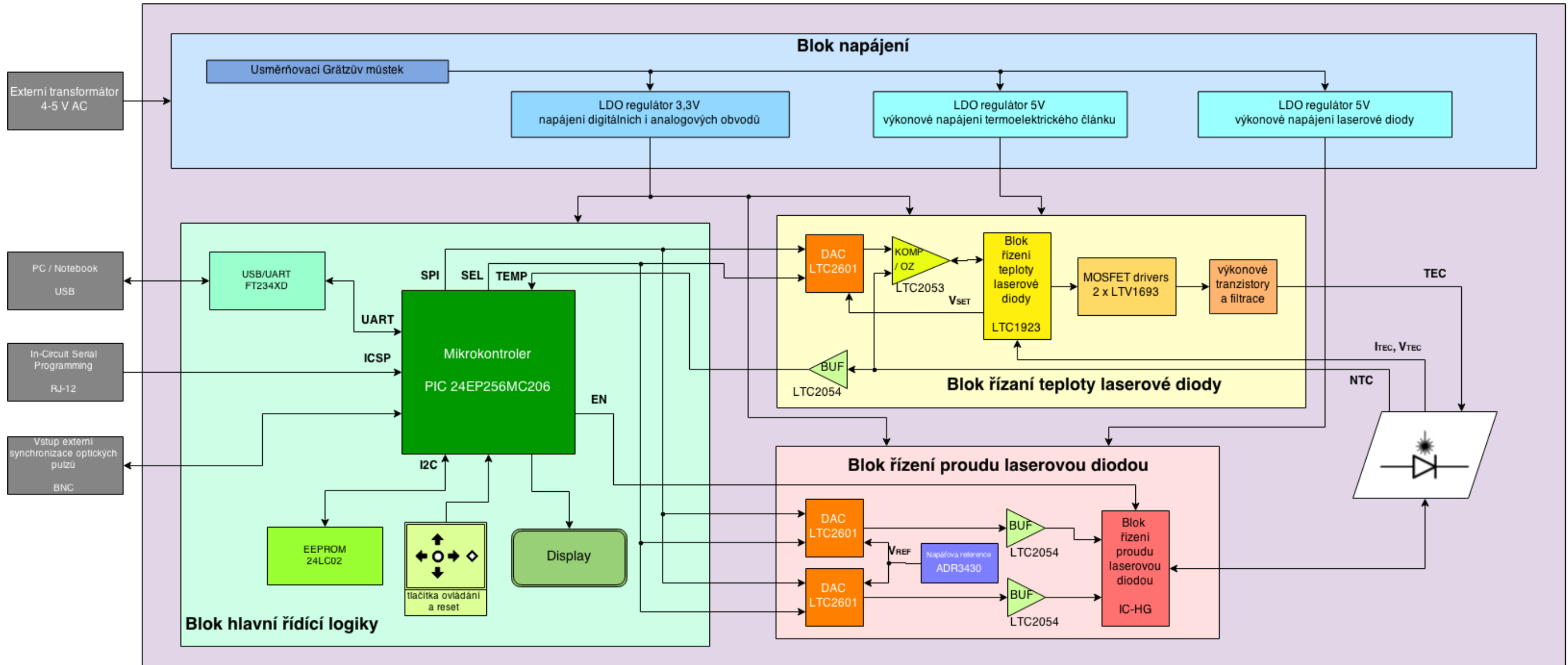
- [34] UNIVERSAL LASER SYSTEMS, INC. Universal Laser Systems, Inc.: VLS3.60. *Www.ulsinc.com/* [online]. Scottsdale (Arizona), USA, © 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z: <http://www.ulsinc.com/products/vls360/>
- [35] QALITEK INTERNATIONAL INC. *QUALITEK Delta Elite DSP 818: Solder Paste, Low Residue No-Clean: [Datasheet]*. Rev: 12-31-07 818. Addison (Illinoia), USA: Qualitek International, Inc., 2007, s. 2. Dostupné také z: [http://www.qualitek.com/818\\_tds.PDF](http://www.qualitek.com/818_tds.PDF)
- [36] THREE BOND EUROPE SAS. *Three Bond 2217H: Low Temperature Curing Chipbonder: [Technical Bulletin]*. TB 2217H. Milton Keynes, Velká Británie: Three Bond Europe SAS, 2007, s. 3. Dostupné také z: <http://www.somersetolders.com/files/pdf/pdf339.pdf>
- [37] AUTOTRONIK-SMT GMBH. *SMT PICK & PLACE MACHINE: MODEL: BA385V1 / BA385V2 [Datasheet]*. Amberg, Německo: AUTOTRONIK-SMT GmbH, 2006, s. 2. Dostupné také z: [http://www.autotronik-smt.de/images/BA385V1\\_V2\\_E.pdf](http://www.autotronik-smt.de/images/BA385V1_V2_E.pdf)
- [38] AUTOTRONIK-SMT GMBH. *Forced air convection reflow oven: Model: B3020: [Datasheet]*. Amberg, Německo: AUTOTRONIK-SMT GmbH, 2015, s. 2. Dostupné také z: [http://www.autotronik-smt.de/products/images/BS3020\\_E.pdf](http://www.autotronik-smt.de/products/images/BS3020_E.pdf)
- [39] MORAVSKÉ PŘÍSTROJE, A.S. *Moravské přístroje, a.s.* [online] Zlín, 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z: <http://www.mii.cz/>
- [40] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *MPLAB® XC16 C Compiler: [User's Guide]*. Revize E. Chandler (Arizona), USA: Microchip Technology Inc., 2014, s. 395. Dostupné také z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002071E.pdf>
- [41] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *DsPIC33/PIC24 Family Reference Manual: Oscillator Module [Aplikační poznámka]*. Revize A. Chandler (Arizona), USA: Microchip Technology Inc., 2013, s. 50. Dostupné také z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70005131a.pdf>
- [42] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *DsPIC33E/PIC24E Family Reference Manual: Timers [Aplikační poznámka]*. Revize B. Chandler (Arizona), USA: Microchip Technology Inc., 2010, s. 11. Dostupné také z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/S11.pdf>
- [43] FORDATA ELETRONIC CO. LTD. *DOT Matrix LCD Module: FDCC1602L-FLYYBW-91LE: [Datasheet]*. 2008. Great Yarmouth, Velká Británie: ForData Eletronic co. ltd., © 2009, s. 22. Dostupné také z: [citace http://www.farnell.com/datasheets/653661.pdf](http://www.farnell.com/datasheets/653661.pdf)
- [44] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *DsPIC33E/PIC24E Family Reference Manual: Analog-to-Digital Converter: [Aplikační poznámka]*. Revize C. Chandler (Arizona), USA: Microchip Technology Inc., 2013, s. 96. Dostupné také z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70621c.pdf>
- [45] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *DsPIC33/PIC24 Family Reference Manual: Serial Peripheral Interface: [Aplikační poznámka]*. Revize A. Chandler (Arizona), USA:

Microchip Technology Inc., © 2014, s. 42. Dostupné také z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70005185a.pdf>

- [46] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *DsPIC33/PIC24 Family Reference Manual: Inter-Integrated Circuit™*: [Aplikační poznámka]. Revize F. Chandler (Arizona), USA: Microchip Technology Inc., © 2014, s. 74. Dostupné také z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70000195f.pdf>
- [47] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *DsPIC33/PIC24 Family Reference Manual: Universal Asynchronous Receiver Transmitter*: [Aplikační poznámka]. Revize E. Chandler (Arizona), USA: Microchip Technology Inc., © 2013, s. 56. Dostupné také z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70000582e.pdf>
- [48] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *DsPIC33E/PIC24E Family Reference Manual: High-Speed PWM*: [Aplikační poznámka]. Revize C. Chandler (Arizona), USA: Microchip Technology Inc., © 2011, s. 130. Dostupné také z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70645C.pdf>
- [49] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Windows 7. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Windows 7* [online]. c2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Windows\\_7](http://cs.wikipedia.org/wiki/Windows_7)

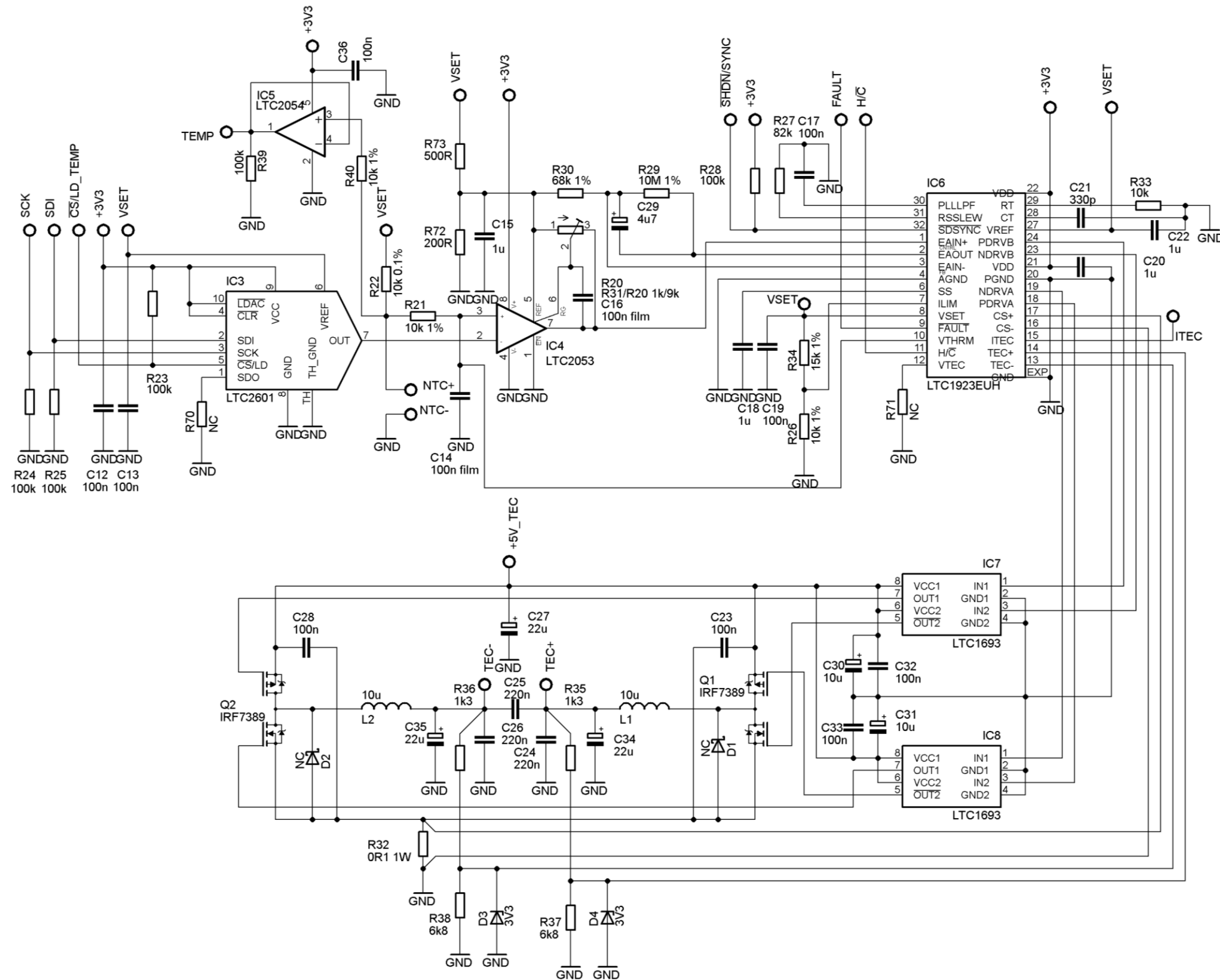
# Příloha A

## Blokové schéma zapojení optického zdroje se superluminiscenční diodou



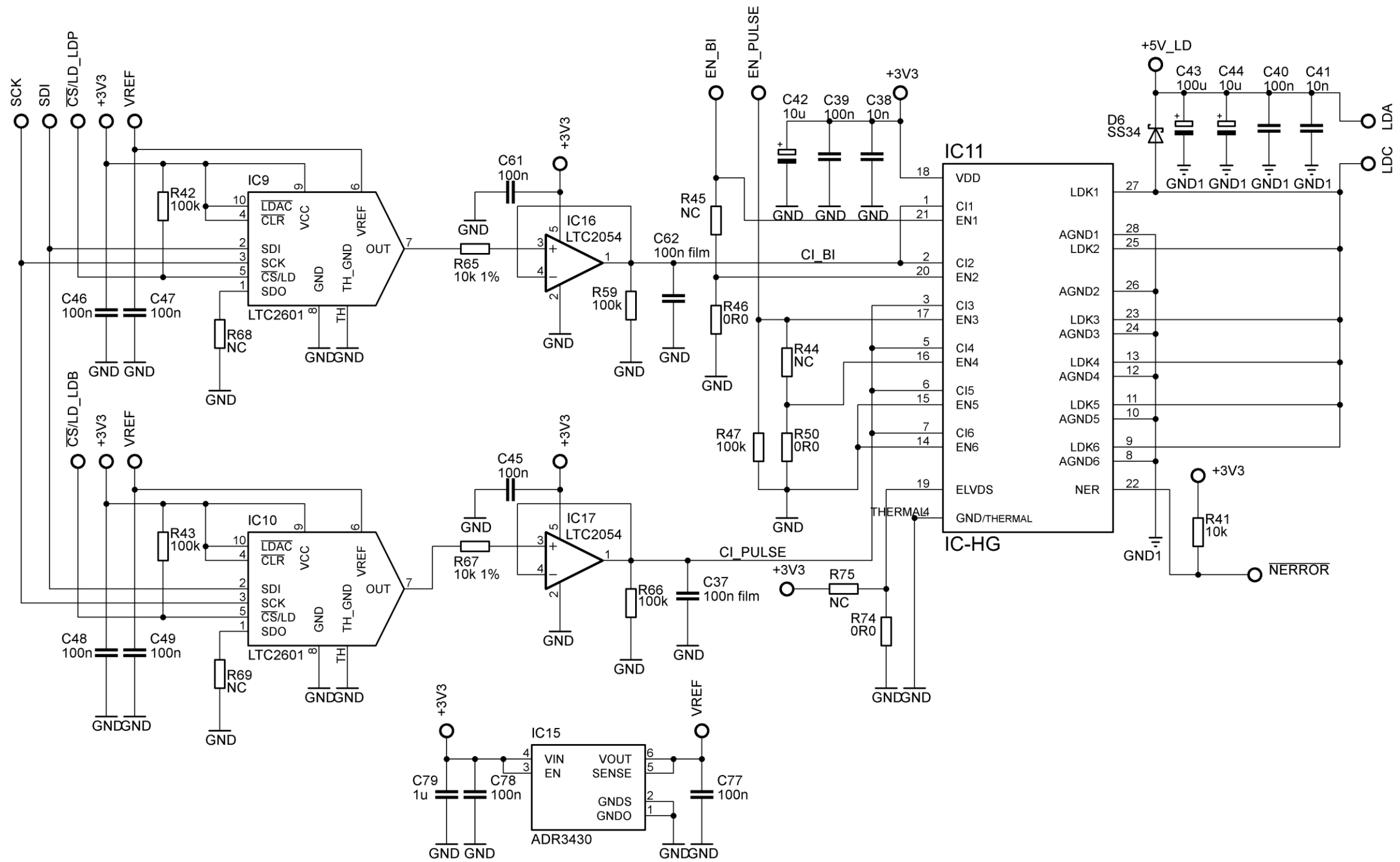
# Příloha B

## Schéma zapojení bloku řízení teploty



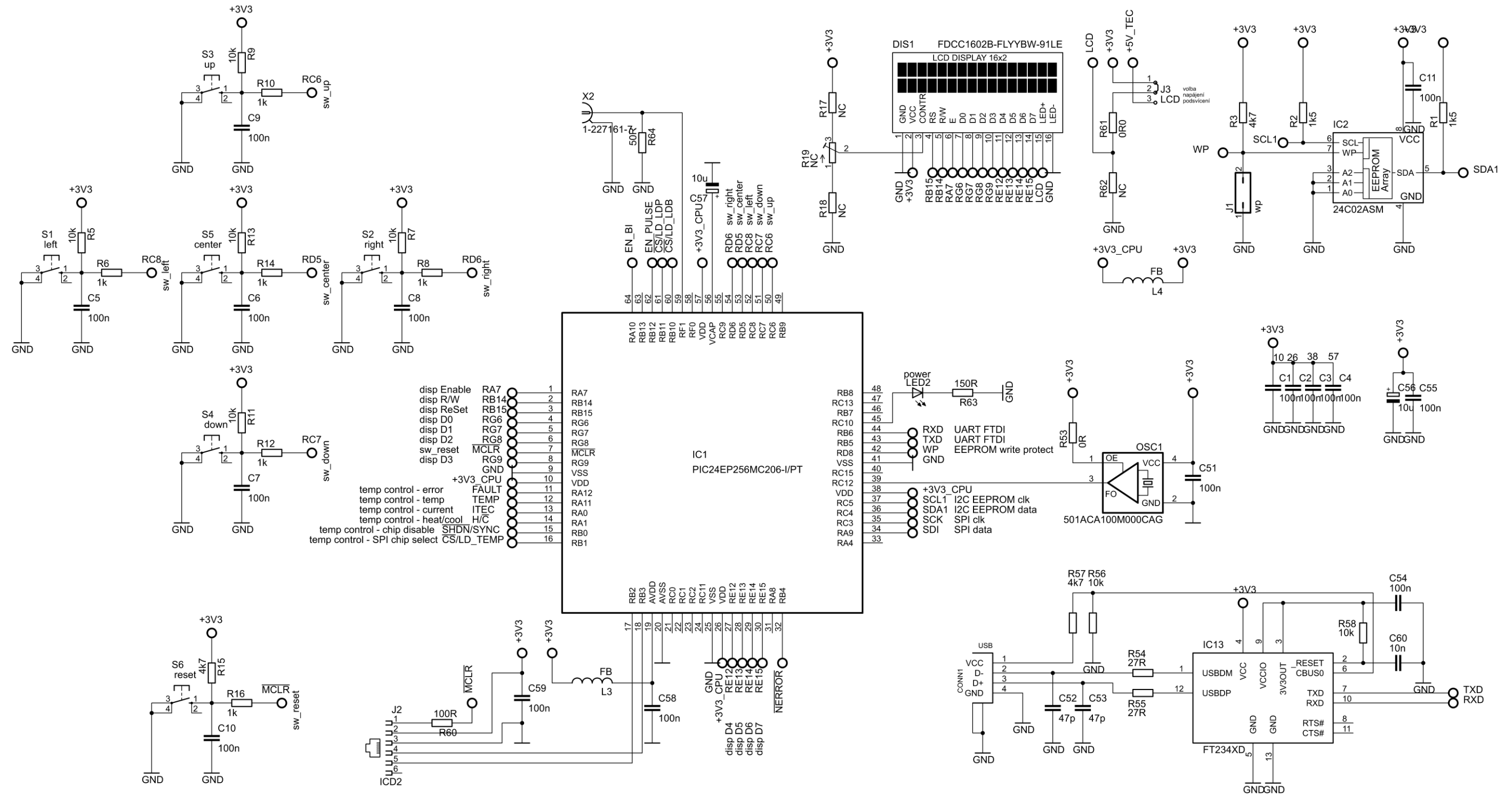
# Příloha C

## Schéma zapojení bloku řízení proudu laserovou diodou



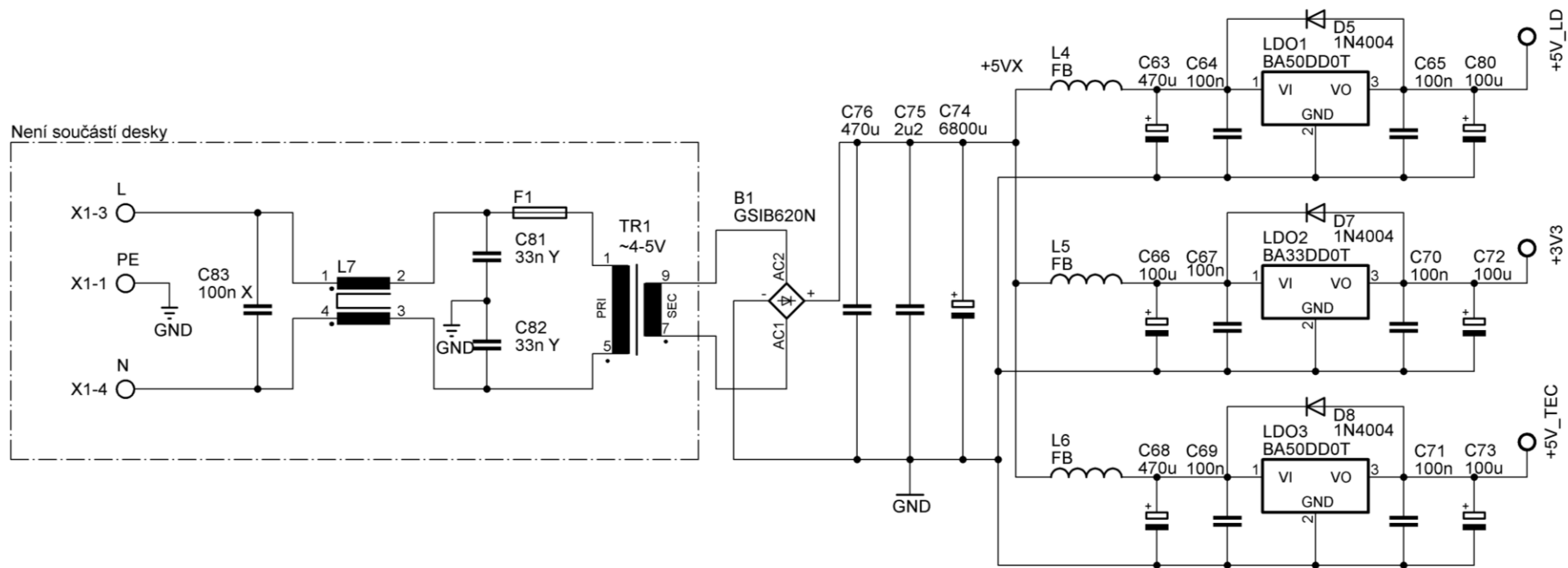
# Příloha D

## Schéma zapojení hlavního bloku řízení s periferiemi



## Příloha E

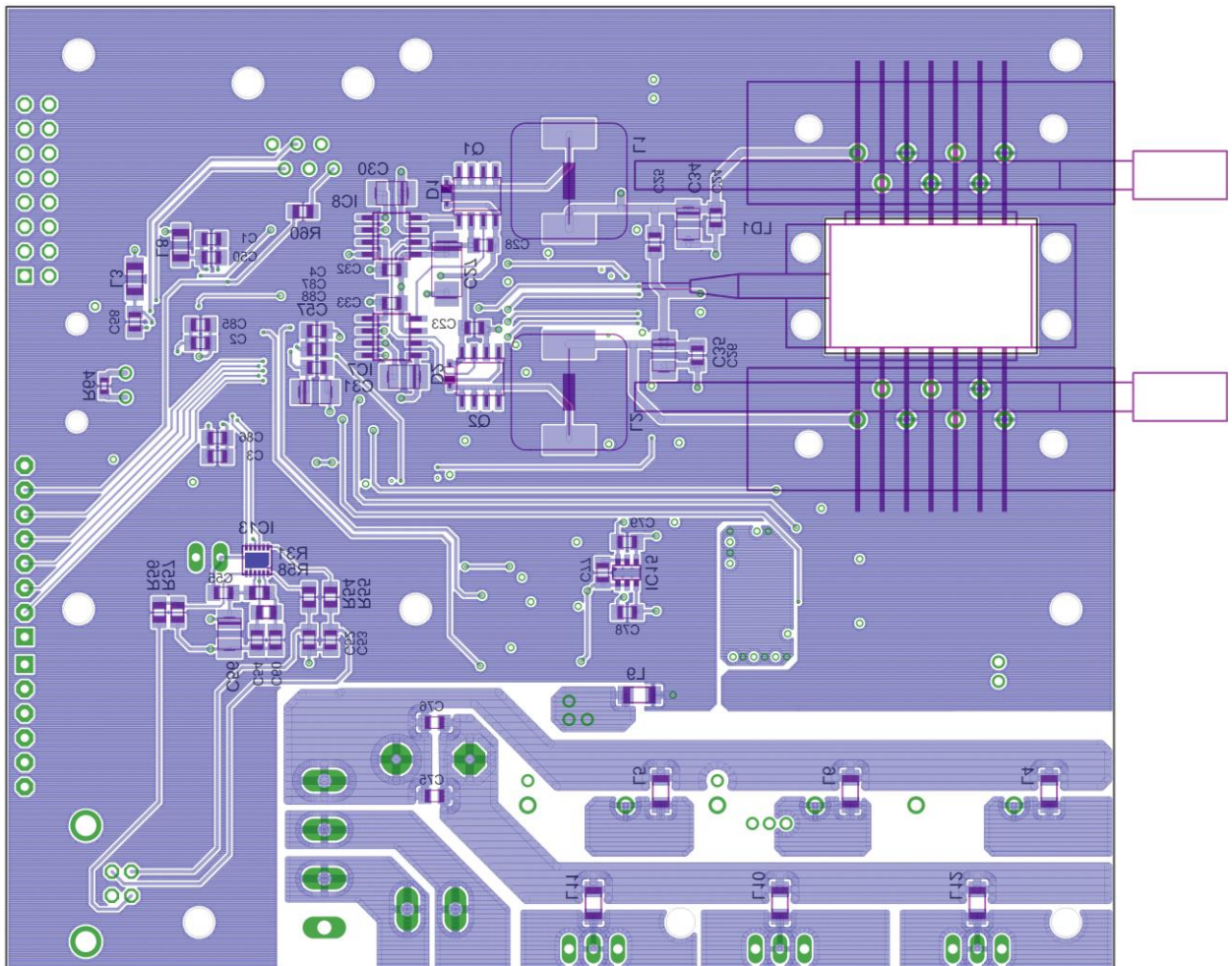
### Schéma zapojení bloku napájení doplněné o síťový transformátor a síťový filtr



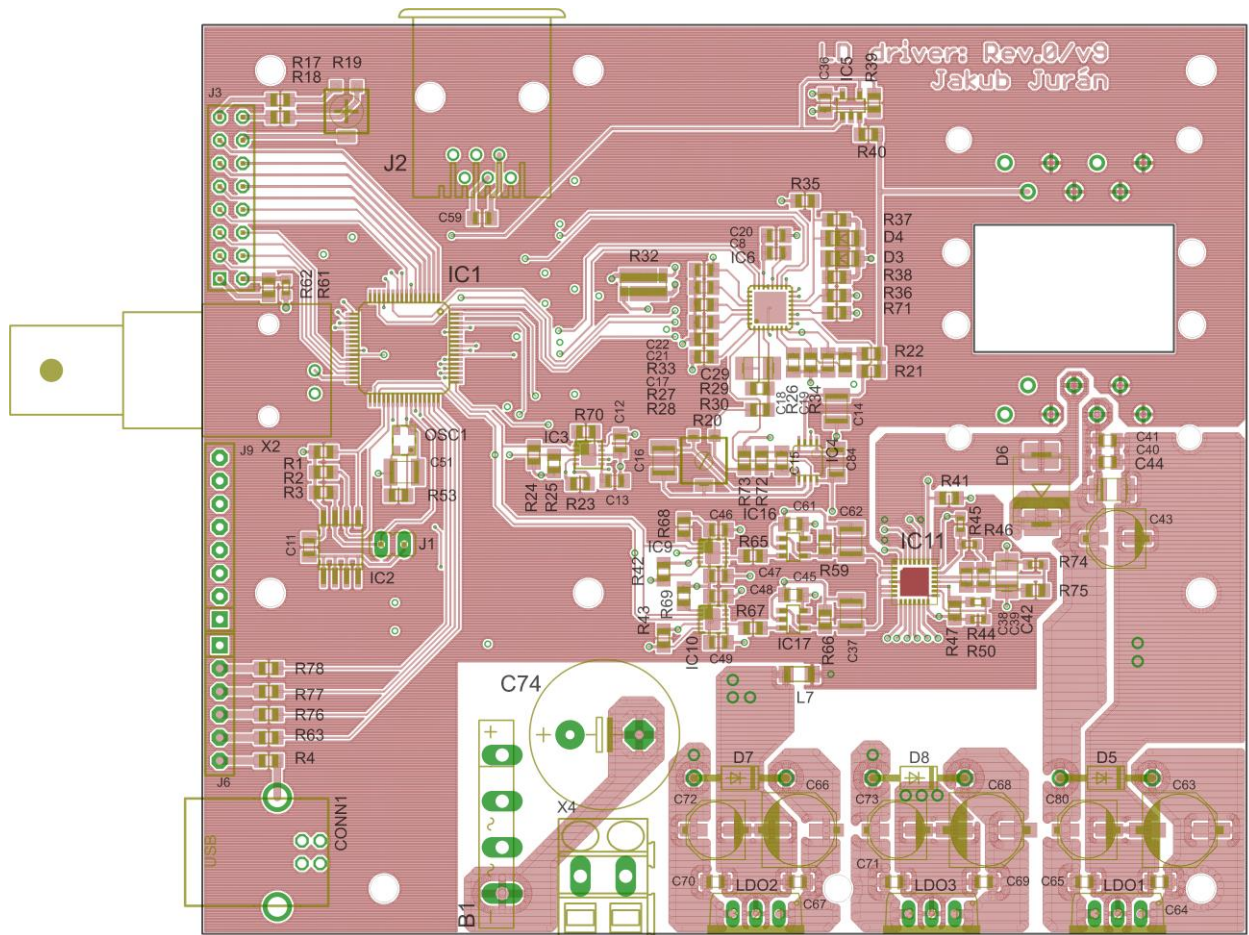
## Příloha F

### Konstrukční návrh hlavní řídicí desky

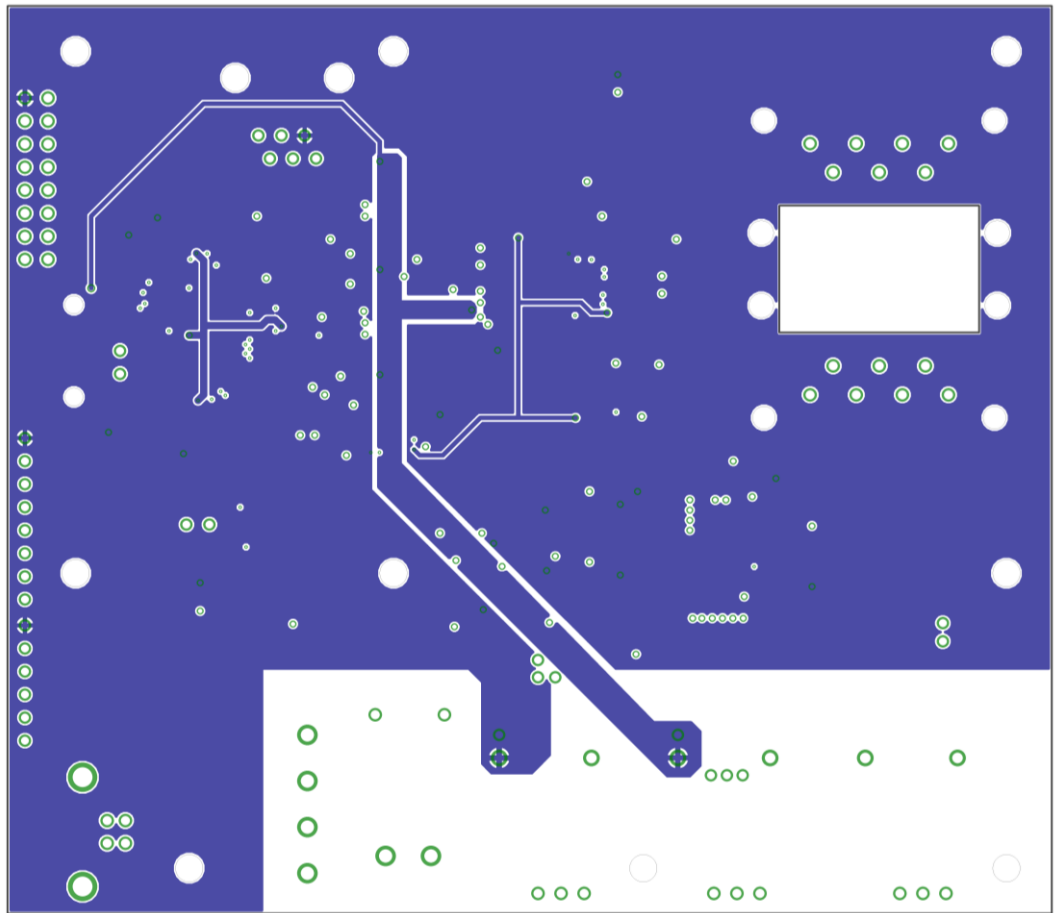
- spodní strana, pohled z vrchu



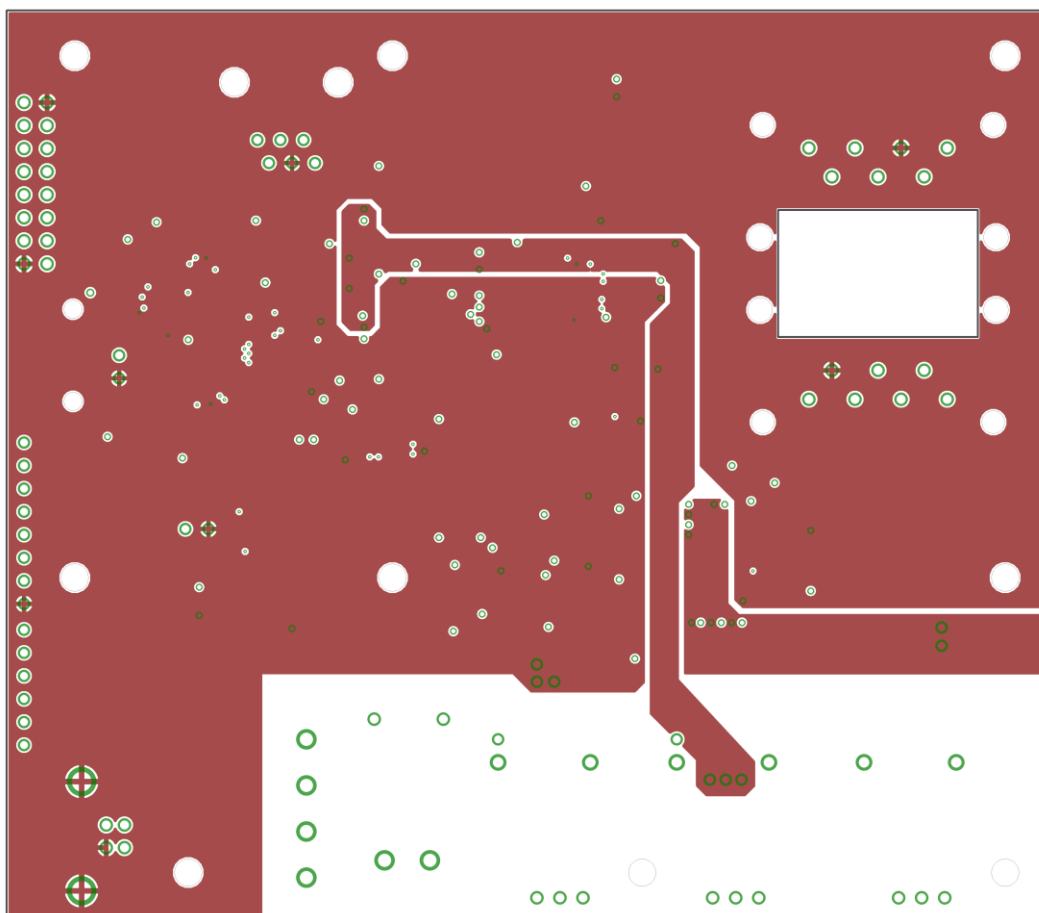
- vrchní strana



- první vnitřní vrstva (napájení)



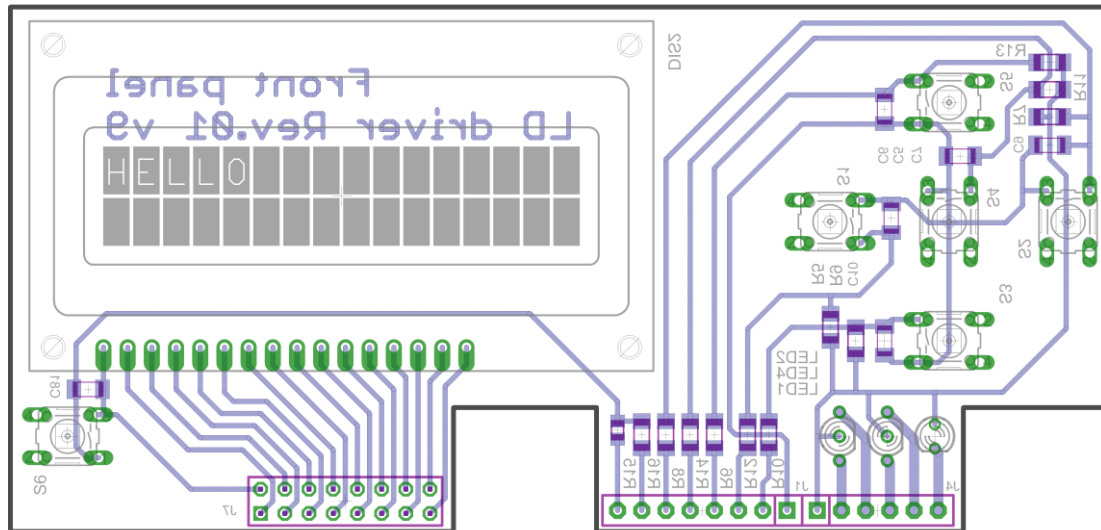
- druhá vnitřní vrstva (zem)



# Příloha G

## Konstrukční návrh desky předního panelu

- spodní strana, pohled z vrchu (ze předu)



## Příloha H

### Seznam použitých součástek hlavní desky

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Rezistory</b>		
R1	1,5 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R2	1,5 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R3	4,7 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R4	150 $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R5	100 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R20	10 k $\Omega$	odporový trimr, SMD typ pouzdra 53YJ
R21	10 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R22	10 k $\Omega$ , $\pm 0,1$ %	SMD 0805, přesný
R23	100 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R24	100 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R25	100 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R26	10 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R27	82 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R28	100 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R29	10 M $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R30	68 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R31	100 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R33	10 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R32	0,15 $\Omega$ , $\pm 1$ %, 2W	SMD 2010W (na šířku), výkonový
R34	15 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R35	1,3 k $\Omega$ , $\pm 5$ %	SMD 0805
R36	1,3 k $\Omega$ , $\pm 5$ %	SMD 0805
R37	6,8 k $\Omega$ , $\pm 5$ %	SMD 0805
R38	6,8 k $\Omega$ , $\pm 5$ %	SMD 0805
R39	100 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R40	10 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R41	10 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R42	100 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R43	100 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R46	0 $\Omega$	SMD 0603
R47	100 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R50	0 $\Omega$	SMD 0603
R53	100 $\Omega$ , $\pm 5$ %	SMD 0805
R54	27 $\Omega$ , $\pm 5$ %	SMD 0805
R55	27 $\Omega$ , $\pm 5$ %	SMD 0805

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Rezistory, pokračování</b>		
R56	10 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R57	4,7 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R59	100 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R60	100 $\Omega$ , $\pm 5$ %	SMD 0805
R61	10 $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0603
R62	200 $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R63	150 $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R64	50 $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0603
R65	10 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R66	100 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R67	10 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R72	680 $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R73	680 $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R74	0 $\Omega$	SMD 0603
R76	150 $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R77	150 $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805
R78	150 $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Kondenzátory</b>		
C1	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C11	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C12	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C13	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C14	100 nF / 16 V	fóliový, dielektrikum PPS, SMD 1210
C15	1 $\mu$ F / 25 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C16	100 nF / 16 V	fóliový, dielektrikum PPS, SMD 1210
C17	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C18	1 $\mu$ F / 25 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C19	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C2	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C20	10 $\mu$ F / 10 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C21	330 pF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C22	1 $\mu$ F / 25 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C23	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C24	220 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C25	220 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C26	220 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C27	47 $\mu$ F / 10 V	Elektrolytický tantalový, SMD 2312, typ C

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Kondenzátory, pokračování</b>		
C28	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C29	4,7 $\mu$ F / 25 V	Elektrolytický tantalový, SMD 1411, typ B
C3	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C30	10 $\mu$ F / 16 V	Elektrolytický tantalový, SMD 1210, typ B
C31	10 $\mu$ F / 16 V	Elektrolytický tantalový, SMD 1210, typ B
C32	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C33	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C34	4,7 $\mu$ F / 25 V	Elektrolytický tantalový, SMD 1411, typ B
C35	4,7 $\mu$ F / 25 V	Elektrolytický tantalový, SMD 1411, typ B
C36	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C37	100 nF / 16 V	fóliový, dielektrikum PPS, SMD 1210
C38	10 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C39	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C4	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C40	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C41	10 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C42	10 $\mu$ F / 16 V	Elektrolytický tantalový, SMD 1210, typ B
C43	100 $\mu$ F / 16 V	Elektrolytický hliníkový, SMD, typ D
C44	10 $\mu$ F / 16 V	Elektrolytický tantalový, SMD 1210, typ B
C45	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C46	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C47	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C48	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C49	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C50	1 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C51	100 nF / 16 V	fóliový, dielektrikum PPS, SMD 1210
C52	47 pF / 50 V	keramický, dielektrikum NP0, dielektrikum NP0, SMD 0805
C53	47 pF / 50 V	keramický, dielektrikum NP0, dielektrikum NP0, SMD 0805
C54	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C55	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C56	10 $\mu$ F / 16 V	Elektrolytický tantalový, SMD 1210, typ B
C57	10 $\mu$ F / 16 V	Elektrolytický tantalový, SMD 1210, typ B
C58	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C59	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C60	10 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C61	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C62	100 nF / 16 V	fóliový, dielektrikum PPS, SMD 1210
C63	470 $\mu$ F / 16 V	Elektrolytický hliníkový, SMD, typ F
C64	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C65	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Kondenzátory, pokračování</b>		
C66	100 µF / 25 V	Elektrolytický hliníkový, SMD, typ E
C67	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C68	470 µF / 16 V	Elektrolytický hliníkový, SMD, typ F
C69	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C70	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C71	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C72	100 µF / 16 V	Elektrolytický hliníkový, SMD, typ D
C73	100 µF / 16 V	Elektrolytický hliníkový, SMD, typ D
C74	6800 µF / 16 V	elektrolytický hliníkový, vývodový, rozteč 7,5 mm
C75	1 µF / 25 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C76	1 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C77	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C78	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C79	1 µF / 25 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C8	10 µF / 10 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C80	100 µF / 16 V	Elektrolytický hliníkový, SMD, typ D
C84	100 nF / 16 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 1206
C85	1 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C86	1 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C87	1 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C88	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Polovodiče</b>		
<b>Integrované obvody</b>		
IC1	PIC24EP256MC206-I/PT	mikrokontrolér, SMD TQFP-64
IC2	24LC02B-I/SN	sériová EEPROM, SMD SO-08
IC15	ADR3430ARJZ-R7	napěťová reference 3 V, SMD SOT-23-6
IC13	FT234XD-R	převodník USB na UART, SMD DFN-12
IC11	iC-HG	řadič proudu laserové diody, SMD QFN-28
IC7	LTC1693-1IS8#PBF	řadič výkonových MOSFET tranzistorů, SMD SO-08
IC8	LTC1693-1IS8#PBF	řadič výkonových MOSFET tranzistorů, SMD SO-08
IC6	LTC1923EUH#PBF	řadič proudu Peltierovým článkem, SMD QFN-32
IC4	LTC2053	MSOP08
IC16	LTC2054HS5#PBF	operační zesilovač, SMD SOT-23-5
IC17	LTC2054HS5#PBF	operační zesilovač, SMD SOT-23-5
IC5	LTC2054HS5#PBF	operační zesilovač, SMD SOT-23-5
IC10	LTC2601IDD#PBF	16bitový DA převodník, $U_{OUT} = 0$ V po zapnutí, SMD DFN-10
IC3	LTC2601IDD-1#PBF	16bitový DA převodník, $U_{OUT} = \frac{1}{2} \cdot U_{REF}$ po zapnutí, SMD DFN-10
IC9	LTC2601IDD#PBF	16bitový DA převodník, $U_{OUT} = 0$ V po zapnutí, SMD DFN-10

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Polovodiče, pokračování</b>		
<b>Diody</b>		
D3	BZV55-C3V3,115	zenerova dioda, SMD SOD-80C
D4	BZV55-C3V3,115	zenerova dioda, SMD SOD-80C
D5	1N4007	usměrňovací dioda, vývodová DO-41
D6	MBRS320T3G	schottkyho dioda, SMD DO-214AB, typ SMC
D7	1N4007	usměrňovací dioda, vývodová DO-41
D8	1N4007	usměrňovací dioda, vývodová DO-41

<b>Usměrňovače, stabilizátory</b>		
B1	KBU606	usměrňovací diodový můstek, 6 A, vývodový, rozteč 5,5 mm
LDO1	BA50DD0T	stabilizátor napětí, fixní 5 V, vývodový TO-220-FVV bezpotenciálové pouzdro
LDO2	BA33DD0T	stabilizátor napětí, fixní 3,3 V, vývodový TO-220-FVV bezpotenciálové pouzdro
LDO3	BA50DD0T	stabilizátor napětí, fixní 5 V, vývodový TO-220-FVV bezpotenciálové pouzdro

<b>Tranzistory</b>		
Q1	IRF7389PBF	výkonový dvojitý MOSFET tranzistor, SMD SO-08
Q2	IRF7389PBF	výkonový dvojitý MOSFET tranzistor, SMD SO-08

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Konektory</b>		
CONN1	61400416121	USB konektor typ B, vývodový, pravoúhlý
J1	S1G2 + jumper	oboustranná kolíková lišta přímá, 2 piny a zkratovací propojka (povolení zápisu do EEPROM)
J2	WEBP 6-6 CONN	konektor RJ12 6/6 pinů, pro připojení programátoru
J3	S2G16W	oboustranná kolíková lišta zahnutá (90°), 16 pinů (propojení displeje na přední panel)
J6	S1G6W	oboustranná kolíková lišta zahnutá (90°), 6 pinů (propojení LED na přední panel)
J9	S1G8W	oboustranná kolíková lišta zahnutá (90°), 8 pinů (propojení tlačítek na přední panel)
X2	BNC-Z 50RWM	BNC konektor do DPS, pravoúhlý (přívod externích synchronizačních signálů)
X4	ARK210/2EX	šroubovací svorkovnice do DPS, 2 piny, rozteč 5,08 mm (přivedení napájení)

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Indukčnosti</b>		
L1	74477120W	cívka 100 $\mu$ H, 0,18 $\Omega$ , 1,5 A, SMD typ WE-PD
L10	742792118	feritová perlička 0,07 $\Omega$ , 2,5 A, SMD 1206
L11	742792118	feritová perlička 0,07 $\Omega$ , 2,5 A, SMD 1206
L12	742792118	feritová perlička 0,07 $\Omega$ , 2,5 A, SMD 1206
L2	74477120W	cívka 100 $\mu$ H, 0,18 $\Omega$ , 1,5 A, SMD typ WE-PD
L3	742792118	feritová perlička 0,07 $\Omega$ , 2,5 A, SMD 1206
L4	742792118	feritová perlička 0,07 $\Omega$ , 2,5 A, SMD 1206
L5	742792118	feritová perlička 0,07 $\Omega$ , 2,5 A, SMD 1206
L6	742792118	feritová perlička 0,07 $\Omega$ , 2,5 A, SMD 1206
L7	742792118	feritová perlička 0,07 $\Omega$ , 2,5 A, SMD 1206
L8	742792118	feritová perlička 0,07 $\Omega$ , 2,5 A, SMD 1206
L9	742792118	feritová perlička 0,07 $\Omega$ , 2,5 A, SMD 1206

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Ostatní</b>		
LD1	Azimuth 5253W + 5250W	dvojice patič (levá a pravá) pro Butterfly pouzdro laserové diody od výrobce Azimuth Eletronic, ltd. <a href="http://www.azimuth-electronics.com/pdf/E6%20-%205253_5250W%20Series.pdf">http://www.azimuth-electronics.com/pdf/E6%20-%205253_5250W%20Series.pdf</a>
OSC1	501JCA10M0000CAG	mikromechanický oscilátor, 10 MHz, SMD DFN-4, 2,5 x 3,2 mm

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Neosazuje se</b>		
D1	PMEG4010BEA	schotkyho dioda, osadit pouze pokud není integrována přímo v MOSFET tranzistoru, SMD SOD-323
D2	PMEG4010BEA	schotkyho dioda, osadit pouze pokud není integrována přímo v MOSFET tranzistoru, SMD SOD-323
R17		v kombinaci s R18 a R19 může sloužit k nastavení kontrastu LCD displeje, hodnotu zvolit podle použitého displeje SMD 0805
R18		v kombinaci s R17 a R19 může sloužit k nastavení kontrastu LCD displeje, hodnotu zvolit podle použitého displeje, SMD 0805
R19		odporový trimr, v kombinaci s R17 a R18 může sloužit k nastavení kontrastu LCD displeje, hodnotu zvolit podle použitého displeje, SMD typ pouzdra 53YJ

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Neosazuje se, pokračování</b>		
R44	0 Ω	společně s R50 umožňuje připojit další kanál pulsního proudu LD (pokud je zapojen, pak R50 musí být neosazený), SMD 0603
R45	0 Ω	společně s R46 umožňuje připojit další kanál kontinuálního proudu LD (pokud je zapojen, pak R46 musí být neosazený), SMD 0603
R71	100 kΩ	v případě potřeby upožňuje přizemnit nevyužitý výstup z LTC1923, SMD 0805
R75		společně s R74 umožňuje změnu režimu vstupů řadiče proudu LD, jejich hodnoty je nutné volit podle datasheetu, SMD 0805

## Příloha I

### Seznam použitých součástek desky předního panelu

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Kondenzátory</b>		
C5	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C6	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C7	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C9	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C10	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805
C81	100 nF / 50 V	keramický, dielektrikum X7R, SMD 0805

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Rezistory</b>		
R5	10 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 1206
R7	10 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 1206
R9	10 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 1206
R11	10 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 1206
R13	10 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 1206
R6	1 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 1206
R8	1 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 1206
R10	1 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 1206
R12	1 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 1206
R14	1 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 1206
R16	1 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 1206
R15	4,7 k $\Omega$ , $\pm 1$ %	SMD 0805

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Tlačítka</b>		
S1	TC-0110	tlačítko left, 4 vývody
S2	TC-0110	tlačítko right, 4 vývody
S5	TC-0110	tlačítko up, 4 vývody
S3	TC-0110	tlačítko down, 4 vývody
S4	TC-0110	tlačítko centr, 4 vývody
S6	TC-0108-T	tlačítko reset, 4 vývody

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Optosoučástky</b>		
LED1	LED 3MM PURE GREEN 6000/30°	indikační dioda zapnutého stavu, zelená, 3 mm
LED2	L-115WEGW-CA	dvoubarevná indikační dioda, červená/zelená, společná anoda, 3 mm
LED4	L-115WEGW-CA	dvoubarevná indikační dioda, červená/zelená, společná anoda, 3 mm
DIS2	FDCC1602L-FLYYBW-91LE	LCD displej

Označení součástky	Hodnota	Typ, pouzdro
<b>Konektory</b>		
J1	S1G8W	oboustranná kolíková lišta zahnutá (90°), 8 pinů (propojení tlačítek na přední panel), společný s hlavní deskou
J4	S1G6W	oboustranná kolíková lišta zahnutá (90°), 6 pinů (propojení LED na přední panel), společný s hlavní deskou
J7	S2G16W	oboustranná kolíková lišta zahnutá (90°), 16 pinů (propojení displeje na přední panel), společný s hlavní deskou